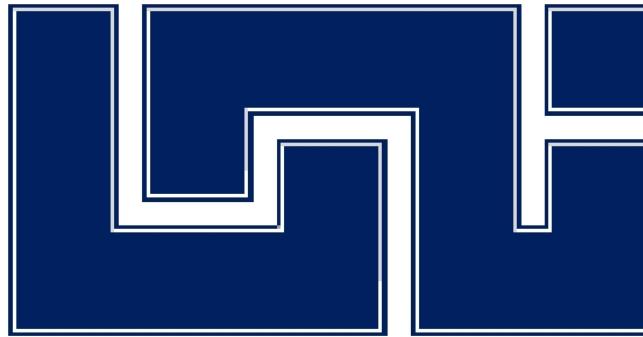


UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA



Líder en Ciencia y Tecnología

Trabajo monográfico para optar al título de Ingeniero en
Telecomunicaciones.

Título:

*“Diseño y simulación de una red LTE-A para la Zona Urbana de la Ciudad
de Granada”*

Autores:

- Edgard Antonio Maltez Rodríguez, Carnet: 2011-39409
- Norman Enrique Valle Martínez, Carnet: 2011-39667

Tutor:

PhD. Marvin Arias Olivas

Managua, Nicaragua, Mayo 2019

Esta página fue dejada en blanco intencionalmente



Dedicatoria

Este trabajo monográfico está dedicado especialmente a mi madre, Silvia Rodríguez, y a mis hermanos, por su apoyo incondicional y motivación, para la finalización de esta etapa de mi vida, para poder superar y seguir buscando nuevas metas y objetivos futuros en mi vida.

Edgard Antonio Maltez Rodríguez.



Agradecimientos

Queremos agradecerle muy especialmente a nuestro tutor PhD Marvin Arias Olivas, siempre estaremos agradecidos con él, por apoyarnos, motivarnos y brindarnos consejos, en un paso que creímos muy lejano, por su disposición y tiempo, por ayudarnos en cada etapa de esta monografía, también agradecerle a todas las personas que nos tendieron la mano con consejos y documentos para la realización y culminación de este trabajo monográfico.



Abstract

Currently, the increase in demand for mobile telephony for better services and better connections is evident. The combination of an improvement in network coverage and the increasing adoption of smartphones, coupled with the use of data, demonstrate that consumers are already migrating rapidly to 4G services. The need for higher speeds, efficient use of spectrum and power, has led research and development groups such as the 3gpp, to design standards that adapt to better requirements, that the greater part is the speed of data transmission. In Nicaragua there is already an LTE network relay 8, which can facilitate the implementation of an LTE-Advanced network, in order to improve local market connections, improving data transmissions.

Our monographic work has as its purpose the design and simulation of an LTE-Advanced network for the urban area of Granada, analyzing the advantages over its predecessor and based on a Radio Network Planning methodology for the sizing of the network, with the planning tool of Forks Atoll™.

With the tool of Atoll™ optimized to work in the urban area of Granada we can obtain the following results, with the predictions of signal coverage we have signal power higher than -95dB, acceptable for LTE-A technology, in the study $C / (I + N)$, we have more signal than noise in most of the map around between 10 and superior than 20dB, with predictions of effective throughput coverage, we can see that the areas closest to the eNodeB, 220 Mbps. Additionally, with Monte Carlo predictions, we can see that even with a high user load, the network does not present a significant rejection that could affect it.

In conclusion, taking into account the features added by LTE-Advanced that improve performance and speed, this is best represented in services such as streaming Media YouTube, Netflix, Amazon, where we can watch videos in high quality without the video stops Thanks to the implementation of a Radio Network Planning methodology for the dimensioning of the LTE-Advanced network, it was possible to make or estimate a nominal plan for the urban area of the City of Granada, Nicaragua.

Resumen

En la actualidad, el incremento de la demanda en la telefonía móvil por mejores servicios y mejores conexiones es evidente. La combinación de una mejora en la cobertura de red y la creciente adopción de teléfonos inteligentes, sumada al uso de datos demuestra que los consumidores ya están migrando rápidamente a servicios 4G. La necesidad de mayor velocidad, uso eficiente del espectro y de potencia, ha hecho que grupos de investigación y desarrollo como la 3gpp, diseñar estándares que se adapten a mejores requerimientos, que la mayor parte es la velocidad de transmisión de datos. En Nicaragua ya existe una red LTE reléase 8, lo que puede facilitar la implementación una red LTE-Avanzada, en función de mejorar las conexiones del mercado local logrando optimizar las transmisiones de datos.

Nuestro trabajo monográfico tiene como propósito el diseño y simulación de una red LTE-Avanzada para la zona urbana de Granada, Nicaragua, analizando las ventajas sobre su predecesor y basándonos en una metodología de Radio Network Planning para el dimensionamiento de la red, con la herramienta de planeación de Forks Atoll™.

Con la herramienta de Atoll™ optimizada para trabajar en la zona urbana de Granada, Nicaragua podemos obtener los siguientes resultados, con la predicciones de cobertura por señal tenemos potencia de señal superiores a -95dB, aceptables para la tecnología LTE-A, en el estudio C/(I+N), tenemos más señal que ruido en la mayor parte del mapa alrededor de entre 10 y mayores a 20dB, con las predicciones de cobertura por throughput efectivo, se puede observar que las zonas más cercanas a los eNodeB, 220 Mbps. Adicionalmente, con las predicciones Monte Carlo podemos ver, que aun con una alta carga de usuarios, la red no presenta un rechazo significativo que pueda afectar.

Como conclusión teniendo en vista las características que añade LTE-Avanzado que mejoran el rendimiento y la velocidad, esto se ve mejor representados en los servicios como por ejemplo, el streaming Media YouTube, Netflix, Amazon, donde podremos ver videos en alta calidad sin que el video se detenga. Gracias a la implementación de una metodología de Radio Network Planning para el dimensionamiento de la red LTE-Avanzada se pudo realizar o hacer una estimación de un plan nominal para la zona urbana de la Ciudad de Granada, Nicaragua.

Lista de Figuras

Figura 1. Arquitectura básica EPS Figura obtenida de: [3].....	8
Figura 2. Esquema de transmisión OFDMA obtenida de: [6]	12
Figura 3. Asignación de recursos en SC-FDMA diferentes usuarios, obtenida de: [6]..	14
Figura 4. Intra-Banda Continua obtenida de: [7]	15
Figura 5. Intra-Banda discontinua obtenida de: [7].....	15
Figura 6. Inter-Banda obtenida de: [7].....	16
Figura 7. Codewords y layers para 8 puertos de antena obtenida de: [8]	17
Figura 8. Transmisión y recepción de un repetidor y un relay node obtenida de: [9]	18
Figura 9. Canalización del sistema LTE en función de número sub-portadoras. Obtenida de: [10]	18
Figura 10. Número de PRB en función de canalización obtenida de: [10]	19
Figura 11. Relación canalización número de PRB en sistema LTE obtenida de: [11]...	19
Figura 12. Interferencia Celular obtenida de: [2]	21
Figura 13. Esquemas de reúso de frecuencias en LTE implementados a través de una estrategia ICIC obtenida de: [2].....	21
Figura 14. Arquitectura Relay LTE-A obtenida de: [3].....	22
Figura 15. Diagramas de constelación de los esquemas de modulación usados por LTE R8 y LTE-A R10 obtenida de: [14]	23
Figura 16. Esquemas de modulación utilizados en función de la SNR obtenida de: [14]	25
Figura 17. Categorías de usuario obtenido de: [9]	29
Figura 18. Radio Link budget tradicional obtenido de: [17]	30
Figura 19. Creación de un nuevo proyecto.	44
Figura 20. Coordenadas Nicaragua Atoll™	44
Figura 21. Mapas Clutter class, DTM y vector de la ciudad de Granada.	45
Figura 22. Sitios existentes en google earth.	46
Figura 23. Coordenadas de sitios y creación de sitios en Atoll™	46
Figura 24. Sitios ubicados en Software Atoll™	47
Figura 25. Configuración de parámetros globales.....	47
Figura 26. Elección de banda de frecuencia en Atoll™	48
Figura 27. Calibración inicial.	50
Figura 28. Calibración del modelo de propagación SPM antes y después.	51
Figura 29. Parámetros de la antena.	52
Figura 30. Patrones de radiaciones horizontal y vertical.	52
Figura 31. Configuración de plantilla eNB transmisores y celdas.	53
Figura 32. Configuración MIMO eNB Tx/Rx	55
Figura 33. Configuración MIMO en equipo usuario categoría 6 Tx/Rx.....	55
Figura 34. Configuración de agregación de portadora en Atoll™	56



Figura 35. Configuración de servicios en el software Atoll™	57
Figura 36. Perfiles de usuario configurados en Atoll™	58
Figura 37. Configuración terminal móvil Atoll™.	58
Figura 38. Configuración de movilidades.	59
Figura 41. Planificación automática de Physical Cell ID.....	61
Figura 42. Cobertura por transmisor.	62
Figura 43. Zona de cobertura por nivel de señal.	63
Figura 44. Histograma de cobertura por nivel de señal.....	63
Figura 45. Zonas solapadas.....	64
Figura 46. Histograma de zonas solapadas	65
Figura 47. Análisis de servicio en el PDSCH DL e Histograma.....	66
Figura 48. PDSCH C (I+N) DL e Histograma	67
Figura 49. Análisis de servicio en el UL	68
Figura 50. Análisis C/ (I+N) en uplink.....	69
Figura 51. Análisis de área de servicio en el DL.	70
Figura 52. Cobertura por throughput portadora principal y secundaria en DL e Histograma.....	72
Figura 53. Cobertura por throughput portadora principal + portadora secundaria agregación de portadora en DL e Histograma	73
Figura 54. Cobertura por nivel de throughput UL portadora principal +Secundaria agregación de portadora e Histograma	74
Figura 55. Configuración de simulación Monte Carlo.....	75
Figura 56. Densidad del entorno urbano	75
Figura 57. Simulación Monte Carlo Scaling Factor 1	76
Figura 58. Simulación Monte Carlo Scaling Factor 3.	76
Figura 59. Simulación Monte Carlo Scaling Factor 5	77



Lista de tablas

Tabla 1.Comparativa LTE release 8 y LTE-release 10 obtenida de: [5].....	12
Tabla 2. Canales Descendentes obtenidas de: [10].....	20
Tabla 3. Canales ascendentes obtenidas de: [10]	20
Tabla 4. Bandas de frecuencia asignadas para LTE (negro) y LTE-Advanced (rojo) obtenida de: [12]	23
Tabla 5. Esquemas de modulación usados en LTE release 8 y release 10 obtenida de: [13].....	24
Tabla 6.Tabla de Esquema de modulación y codificación obtenida de: [14]	26
Tabla 7.Tabla de parámetros estándar del sistema. (Elaboración propia)	30
Tabla 8. MCS (Modulation Code Scheme) SINR obtenidas de: [19].....	32
Tabla 9. Link Budget para el Downlink. (Elaboración propia).....	33
Tabla 10. Link budget para el uplink. (Elaboración propia)	33
Tabla 11.Tabla de parámetros para dimensionamiento de capacidad. (Elaboración propia)	35
Tabla 12. Proveedor Huawei para los diferentes servicios obtenida de: [25]	37
Tabla 13. Cálculo del Uplink throughput por servicio. (Elaboración propia)	37
Tabla 14. Cálculo del Throughput por servicio para el Downlink. (Elaboración propia)	38
Tabla 15. Proveedor Huawei para entornos urbano: [25].....	39
Tabla 16. Comportamiento del usuario. (Elaboración propia)	39
Tabla 17. Predicción de cobertura por nivel de señal obtenido de: [28]	42
Tabla 18.Predicción de cobertura calidad de señal obtenida de: [28]	43
Tabla 19. Banda 4 AWS segmentación Telcor obtenido de: [29]	48
Tabla 20. Parámetros de canalización para tener en cuenta obtenido de: [10].....	48
Tabla 21. Estadísticas de simulaciones realizadas a diferentes Scaling Factor. (Elaboración propia)	77
Tabla 22. Descripción de servicio por diferentes simulaciones Monte Carlo parte 1. (Elaboración propia)	79
Tabla 23. Descripción de servicio por diferentes simulaciones Monte Carlo parte 2. (Elaboración propia)	80



Lista de abreviaciones

1G	Primera Generación
2G	Segunda Generación
3G	Tercera Generación
3GPP	3rd Generation Partnership Project
4G	Cuarta Generación
CC	Component Carrier
DFT	Discrete Fourier Transforms
DL	Downlink
eNB	evolved Node B
EPC	Evolved Packet Core
EPS	Evolved Packet System
E-UTRAN	UMTS Terrestrial Radio Access Network
FDD	Frequency Division Duplexing
GI	Interval Guard
HSS	Home Subscriber Server
ICIC	Cell Interference Coordination
iFFT	Inverse Fast Fourier Transform
IMS	IP Multimedia Subsystem
IMT-Advanced	International Mobile Telecommunications-Advanced
LTE	Long Term Evolution
MAPL	Maximum Allowed Path Loss
MCS	Modulation and Coding Scheme
MIMO	Multiple Input Multiple Output
MME	Mobile Management Entity
MU-MIMO	Multi-user MIMO



OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiplex
PAPR	Peak-to-Average Power Ratio
PBCH	Physical Broadcast Channel
PDCCH	Physical Downlink Control Channel
PDSCH	Physical Downlink Shared channel
P-GW	Packet Data Network Gateway
PHICH	Physical Hybrid ARQ Indicator Channel
PMCH	Physical Multicast Channel
PRACH	Physical Random Access Channel
PRB	Physical Resource Block
PUCCH	Physical Uplink Control Channel
PUSCH	Physical Uplink Shared Channel
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
Qos	Quality of service
QPSK	Quadrature Phase-Shift Keying
SC-FDMA	Single Carrier Frequency Division Multiple Access
S-GW	Serving Gateway
SIP	Session Initiation Protocol
SU-MIMO	Single User- MIMO
TDD	Time Division Duplex
UE	User Equipment
UL	UPLink
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
VoIP	Voice over IP
WIMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access



Tabla de contenido

Dedicatoria	ii
Agradecimientos	iii
Abstract	iv
Resumen	v
Lista de Figuras	vi
Lista de tablas	viii
Lista de abreviaciones	ix
Capítulo I. Introducción	1
1.1. Introducción	1
1.2. Objetivos	2
1.3. Estructura de trabajo monográfico	3
1.4. Justificación	4
Capítulo II. Marco Referencial	5
2.1. Evolución de las comunicaciones móviles	5
2.1.1 Sistema móvil de 1G	5
2.1.2 Sistema móvil de 2G	5
2.1.3. Sistema móvil 3G	6
2.1.4. Sistema móvil 4G	6
2.1.5. Sistema móvil 5G	7
2.2.1 Arquitectura EPS (Evolved Packet System)	7
2.2.1.2. Red de acceso E-UTRAN	8
2.2.1.3. Red troncal EPC	8
2.2.1.4. IP Multimedia Subsystem (IMS)	10
2.2.1.5. Equipo de usuario	10
2.3. Requerimiento de IMT-Advanced	10
2.4. Especificaciones técnicas de LTE-Advanced	11
2.5. Tecnologías de acceso múltiple	12
2.5.1 OFDMA	12
2.5.2. SC-FDMA	13



2.6. Tecnologías propias de LTE-Advanced	14
2.6.1. Carrier Aggregation	14
2.6.2. Técnicas de múltiple antenas para LTE-Advanced.....	16
2.6.3. Relaying (red de nodos relay).....	17
2.7. Interfaz de radio	18
2.7.1 Capa Física.....	18
2.7.2. Physical Resource Block (Bloque de recursos Físicos)	19
2.7.3. Canales físicos	19
2.7.4. Reúso de frecuencias	20
Capítulo III. Análisis de parámetros de LTE-Advanced	22
3.1. Arquitectura.....	22
3.2. Bandas de Frecuencias	22
3.3. Esquema de modulación.....	23
3.4. Velocidad de transmisión	26
3.5. Eficiencia espectral	26
3.6. Latencia	26
3.7. Técnicas de múltiple antena	27
3.8. Movilidad.....	27
3.9. Cobertura y capacidad	28
3.10. Categoría de equipo usuario.....	28
3.11. Servicios y aplicaciones	29
Capítulo IV. Dimensionamiento cobertura y capacidad.....	30
4.1. Dimensionamiento de Cobertura	30
4.2. Dimensionamiento de capacidad	35
Capítulo V. Condiciones iniciales	42
5.1. Elección de Atoll™ como herramienta de trabajo	42
5.1.1. Predicciones de cobertura	42
5.1.2. Simulaciones Monte Carlo	43
5.2.1. Creación de un nuevo proyecto ATOLL™	44
5.2.2. Ubicación de coordenadas área en que se trabajará ATOLL™	44



5.2.3. Importar mapas en Atoll™	45
5.2.4. Ubicación de los sitios y creación de sitios en Atoll™	46
5.2.5. Configuración parámetros globales LTE-A	47
5.2.6. Elección de banda de frecuencia	47
5.2.7. Elección de modelo de propagación	49
5.2.7.1 Calibración de modelo de propagación	49
5.2.8. Elección y configuración de la antena.....	52
5.2.9. Configuración de plantilla del transmisor	53
5.2.10. Implementación de MIMO	54
5.2.10.1 Modo de transmisión y recepción en el UE.....	55
5.2.11. Implementación de agregación de portadoras	56
5.3. Parámetros de tráfico.....	57
5.3.1. LTE-A Servicios	57
5.3.2. Perfiles de usuario	57
5.3.3. Terminales móviles.....	58
5.3.4. Movilidad.....	58
5.3.5. Entornos	59
5.4. Optimización de la red en el software Atoll™	59
5.4.1. Asignación de vecinos	59
5.4.2. Planeación de frecuencia.....	60
5.4.3. Planificación de Physical Cell ID.....	60
Capítulo VI. Predicciones de cobertura.....	62
6.1. Análisis de Predicciones de cobertura sin mapa de tráfico	62
6.1.1. Predicción de cobertura por transmisor	62
6.1.2. Predicción de cobertura por nivel de señal	63
6.1.3. Predicción de Zonas solapadas.....	64
6.2. Análisis de predicciones que dependen del tráfico	65
6.2.1. Predicción de análisis de servicio en el DL.....	66
6.2.2. Predicción de análisis C/ (I+N) en el Downlink	67
6.2.3. Predicción de análisis de servicio en el UL.....	68



6.2.4. Predicción de análisis C/ (I+N) en uplink	69
6.2.5. Predicción de análisis de área de servicio en DL	70
6.2.6. Predicciones de cobertura por nivel de throughput.....	71
Capítulo VII. Simulaciones Monte Carlo.....	75
7.1. Mapas de tráfico	75
Capítulo VIII. Conclusiones y líneas futuras de trabajos	82
8.1. Conclusiones	82
8.2. Recomendaciones y líneas futuras de trabajos monográficos	83
Bibliografía	84
Anexos	86

Capítulo I. Introducción

1.1. Introducción

En los últimos años se ha visto un incremento en la cantidad de usuarios que acceden a Internet y con la popularidad que han ganado los dispositivos móviles nos damos cuenta el futuro de las telecomunicaciones se encuentra en las redes inalámbricas. El diseño de terminales móviles como Smartphones, PDA y Tablet ha obligado a que se cree un mercado competitivo a nivel de hardware, software y una serie de servicios los cuales se han venido desarrollando con la incursión de tecnologías de comunicación las cuales han permitido en su medida el uso masificado de redes de alta velocidad basadas en All-IP, (conocidas como tecnologías 4G), a la par de unas políticas del buen uso del espectro radioeléctrico que permitieran una conectividad a nivel mundial en nuestro diario vivir.

En Nicaragua se ha convertido en un hecho real la necesidad de estar conectados todo el tiempo principalmente entre la población más joven y a pesar que en los últimos meses los proveedores locales se han esforzado en mejorar las redes de acceso para los servicios residenciales, el medio preferido de los usuarios para acceder a los servicios de banda ancha es aquel que les permite la capacidad de estar conectados sin importar el lugar o el momento.

Los operadores de redes móviles están implementando redes 4G para brindar servicios de banda ancha de próxima generación a una base creciente de consumidores ansiosos por experimentar aplicaciones multimedia. Por lo tanto, las redes móviles necesitan un verdadero avance que cumpla con las necesidades actuales y las que se presentaran a futuro, un incremento en la cantidad de usuarios supone la necesidad de mejoras en la cobertura y las tasas de transferencia que dé como resultado una red con la capacidad de cubrir las demandas actuales y posteriores. El Release 10 de LTE promete cubrir dichas demandas con sus avances tecnológicos que disminuyen la latencia, hace un uso más eficiente del espectro, permite la agregación de múltiples portadoras en el canal descendente y por ende ofrece tasas de transferencia de datos muy superiores a sus predecesores.

El propósito de este trabajo monográfico es presentar los parámetros y mejoras del LTE Release 10 que lo convierten en una verdadera tecnología 4G, demostrando el desempeño de dicha red mediante un diseño implementado por simulación usando la herramienta Atoll™ [1], tomando como referencia geográfica la zona urbana de la Ciudad de Granada, Nicaragua para exponer las ventajas, bondades y beneficios que presenta el Release 10 de LTE, así como los requerimientos técnicos necesarios para elaborar tal diseño.

1.2. Objetivos

Objetivo general

- Diseñar una red LTE Release 10 para la zona urbana de la ciudad de Granada mediante el uso de los procesos de Radio Network Planning.

Objetivos específico

- Analizar los parámetros del estándar LTE-A (Release 10) especificados por la 3GPP.
- Realizar el estudio técnico de los requisitos necesarios para cumplir con los estándares de dimensionamiento, cobertura y capacidad establecidos para una red LTE-A.
- Determinar por simulación la cobertura en el área de interés (casco urbano de la Ciudad de Granada) y los posibles niveles de señal de la red LTE-A de acuerdo a especificaciones y recomendaciones por parte de la ITU, 3GPP.
- Analizar el desempeño de la red LTE-A usando el software Atoll™ generando mapas de tráfico usando el método Monte Carlo.

1.3. Estructura de trabajo monográfico.

Este proyecto está estructurado por 8 capítulos que serán descritos a continuación:

El capítulo 1, el contexto del proyecto con una breve introducción al proyecto, así como las motivaciones que nos hicieron escoger esta tecnología.

En el capítulo 2, presentamos un breve repaso sobre las evoluciones de las comunicaciones móviles desde 1G hasta 4G, nos enfocaremos en la arquitectura, características, mejoras y funcionamientos de LTE-A.

El análisis de los parámetros de LTE-A Release 10, se expone en el capítulo 3, tomando como referencia el LTE Release 8 que actualmente está desplegado en Nicaragua para realizar un análisis comparativo.

En el capítulo 4, iniciamos con el proceso de Radio Network Planning (RNP), la fase inicial de una RNP y el dimensionamiento de cobertura y capacidad, que nos permitirá modelar nuestra red, para posteriormente hacer la simulación de la red diseñada usando la herramienta de software Atoll™.

Luego, en el capítulo 5, presentamos la elección del software de trabajo, las configuraciones necesarias para el funcionamiento del mismo, en particular de la herramienta de simulación.

En el capítulo 6, presentamos en detalle las predicciones de cobertura y analizaremos los resultados obtenidos para el casco urbano de la ciudad de Granada, Nicaragua.

Las predicciones de Montecarlo se describen en el capítulo 7, generando mapas de tráfico, que permite analizar el desempeño de la red en función de la interferencia generada por la misma red LTE/LTE-A.

Finalmente, en el capítulo 8, presentamos las conclusiones de la monografía y trabajos futuros de posibles nuevos temas monográficos.

1.4. Justificación

Los avances tecnológicos en el ámbito de las comunicaciones móviles en las últimas décadas han evolucionado de tal manera que nos ha permitido la experiencia de servicios tales como la mensajería multimedia, acceso a servicios web, carga y descarga de paquetes de datos.

A nivel nacional es una realidad inminente el aumento en la cantidad de usuarios locales que demandan servicios de banda ancha (video-llamadas, VoIP, juegos online, descarga de archivos, redes sociales), a ello le podemos sumar los usuarios extranjeros que ingresan como turistas y que en su mayoría son provenientes de países con una mejor infraestructura en sus comunicaciones que les permite una experiencia de usuario notablemente superior a lo que se puede lograr con las tecnologías de acceso a internet implementadas en nuestro país.

Hoy en día estar comunicados es una necesidad indispensable que nos lleva a la utilización de dispositivos móviles que nos permiten solventar esta necesidad, claramente podemos observar que las redes móviles son el principal medio de acceso a los servicios antes mencionados.

Escogemos la ciudad de Granada porque, uno de los fuertes económicos de Nicaragua es el turismo y la ciudad de Granada según INTUR es uno de los destinos más concurridos llegando a acaparar alrededor de la mitad de turistas que ingresan anualmente al país, teniendo en cuenta que a pesar de la implementación de tecnologías como WIMAX y LTE (Release 8) nuestro país no figura en el ranking mundial de cobertura ni de velocidad de datos móviles quedando muy por debajo de los países de origen de los visitantes extranjeros.

En base a lo antes mencionado este trabajo pretende dar una solución al acceso de datos móviles en la ciudad de Granada haciendo uso de la tecnología LTE-Advanced (Release 10) que ofrece potencialmente un desempeño que no ha sido visto en nuestro país, de igual manera con la elaboración de este trabajo monográfico queremos aumentar nuestros conocimientos sobre el funcionamiento de dicha tecnología y su desempeño haciendo uso de un entorno simulado.

Capítulo II. Marco Referencial

2.1. Evolución de las comunicaciones móviles

En la actualidad la tecnología más usada es la telefonía móvil, incluso por encima del internet, telefonía fija y otras tecnologías, alrededor de un 87% de la población mundial es usuario de telefonía móvil. Los avances tecnológicos han permitido crear dispositivos cada vez más sofisticados y capaces de proporcionar una amplia gama de aplicaciones, con la cual su aceptación a nivel mundial es más que evidente, convirtiéndolo en un dispositivo indispensable para la vida cotidiana de la actualidad.

2.1.1 Sistema móvil de 1G

El primer sistema celular fue introducido por la Nippon Telegraph and Telephone (NTT) en 1979 en Japón. Era una tecnología analógica, que era compatible con servicios de telefonía viejos (POTS), la voz con algunos servicios complementarios. Utilizan técnica de duplexado de frecuencia (FDD), empleaba modulación analógica FM, dividían el espectro disponible en canales se repartían a las estaciones bases. Para evita interferencia canales distintos a las estaciones vecinas y por cada llamada se asignaba un canal dedicado por la duración de la misma. [2]

2.1.2 Sistema móvil de 2G

Fue lanzado en 1991, pasaron de ser analógicos a digitales. Utiliza técnica de acceso TDMA (Time Division Multiple Access), la principal característica es que tiene la capacidad de transmitir datos además de voz, además de un nuevo sistema de mensajes cortos SMS.

El sistema GSM, está dedicado principalmente a la voz, la modulación utilizada es GSMK (Gaussian Minimun Shift Keying), que destaca por su continuidad en fase y eficiencia espectral, posee acceso múltiple TDMA/FDD, opera en la banda 900MHZ y más tarde en 1800Mhz.

GPRS (Global Packet Radio Service), mantiene la red GSM, pero realiza cambio en las tramas y los slots (ranuras de tiempo). Permitiéndole alcanzar tasas en el enlace ascendente de 14Kbps y 40 Kbps en el enlace descendente.

EDGE (Enhanced Data rates for Global Evolution), aumenta su velocidad por slots mediante modulación y codificación adaptativa, se usa GSM y además 8-PSK de 3 bits por símbolo, la velocidad que puede alcanzar es 384 Kbps. [2]

2.1.3. Sistema móvil 3G

Una de las principales mejoras es la capacidad de soportar mayores velocidades de transmisión, en comparación a 2G. Tiene dos modos de operación FDD Y TDD. Este sistema trata de hacer una evolución hacia una arquitectura ALL-IP. Es una mezcla de varias tecnologías como GSM, SS7, GPRS, ATM, circuitos conmutados, IP.

CDMA (Code Division Multiple Access). El CDMA utiliza un modo de comunicación de acceso múltiple. Aquí es donde varias transmisiones se realizan sobre el mismo canal simultáneamente. Usando un espectro de velocidad, a cada transmisión se le asigna un código único que corresponde a la fuente y al destino de la señal.

HSPA, provee velocidades hasta de 84 Mbps de bajada y 22 Mbps de subida, a través de una técnica múltiple-antena como MIMO (Multiple-Input Multiple-output) y modulación 64QAM. Presenta combinaciones de varios mecanismos como, modulaciones de mayor orden, nuevos esquemas de codificación. [2]

2.1.4. Sistema móvil 4G

La evolución está impulsada por la creación y desarrollo de nuevos servicios para dispositivos móviles y habilitada por el avance de la tecnología disponible.

La ITU-R estableció los requisitos para las redes de cuarta generación bajo el nombre de IMT-Advanced, algunos de los requisitos consisten en una red basada completamente en conmutación por paquete con una arquitectura plana basada en el protocolo IP (Internet Protocol), velocidades de transferencia de datos mayores a 100 Mbps para altas movilidades y de 1Gbps para entornos relativamente fijos, interoperabilidad con estándares existentes, canalizaciones flexibles, menores tiempos de latencia, entre otros. [3]

Hay organizaciones que son las encargadas de desarrollar estándares de comunicaciones móviles con el fin de cumplir los requisitos del IMT-Advanced. La 3GPP empezó a finales de 2004 la primera especificación del sistema Long Term Evolution (LTE), que fue concluida en 2008 y evolucionada a LTE-Advanced. La IEEE ha creado la familia 802.16 conocida como WiMAX donde la versión 802.16m, también conocida como Wireless MAN-Advanced, ha sido aprobada por la ITU-R como una tecnología IMT-Advanced. [3]

En este punto hemos visto y explorado las características más importantes de las generaciones de comunicaciones móviles. En esta próxima etapa abarcaremos la tecnología donde nos centraremos en LTE-A release 10.

2.1.5. Sistema móvil 5G

La red inalámbrica de la próxima (5^{ta}) generación abordará la evolución más allá del internet móvil, y alcanzará al Internet de las Cosas masivo hacia 2020. La evolución más notable en comparación con las redes 4G y 4.5G (LTE avanzado) actuales es que, aparte del aumento en la velocidad de los datos, los nuevos casos de uso del Internet de las Cosas y de la comunicación requerirán nuevos tipos de desempeño mejorado; como la “latencia baja”, que brinda una interacción en tiempo real a los servicios que utilizan la nube.

La tecnología 5G está caracterizada por 8 especificaciones: [2]

- Una tasa de datos de hasta 10Gbps - > de 10 a 100 veces mejor que las redes 4G y 4.5G
- Latencia de 1 milisegundo
- Una banda ancha 1000 veces más rápida por unidad de área
- Hasta 100 dispositivos más conectados por unidad de área (en comparación con las redes 4G LTE)
- Disponibilidad del 99.999%
- Cobertura del 100%
- Reducción del 90% en el consumo de energía de la red
- Hasta 10 diez años de duración de la batería en los dispositivos IoT (Internet de las Cosas) de baja potencia

2.2.1 Arquitectura EPS (Evolved Packet System)

La arquitectura se diseñó en base a tres requisitos fundamentales, costes reducidos, baja latencia y únicamente la opción de usar conmutación de paquetes.

Presenta cuatro elementos que lo identifican plenamente, como se ilustra en la Figura 1: E-UTRAN (red de acceso), EPC (red de núcleo), la combinación de estos dos recibe el nombre de EPS, los otros elementos serian el IMS (IP Multimedia System) y UE (User equipment). [4]

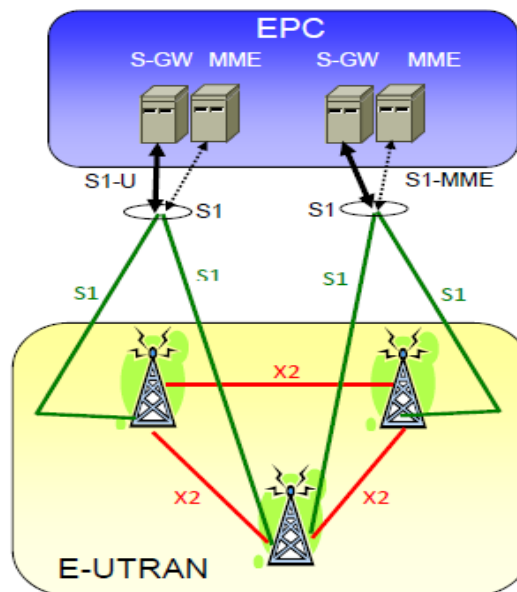


Figura 1. Arquitectura básica EPS Figura obtenida de: [3]

2.2.1.2. Red de acceso E-UTRAN

Está formada por un solo elemento llamado eNB (evolved node B). Esta agrega funcionalidades de red de acceso, estas serán las que proporcionen conectividad entre los usuarios y la red troncal, esto hace que se denomine una arquitectura plana.

Las funciones que realizan los eNBs, incluyen las gestión de recursos de radio (control del radio Bearers, control de admisión de radio, control de movilidad, packet scheduling y asignación dinámica de recursos tanto para Uplink y Downlink), compresión de cabeceras, seguridad de interfaz radio y conectividad con la red troncal EPC. [4]

2.2.1.3. Red troncal EPC

Es la responsable de proporcionar un servicio de conectividad IP para permitir el servicio de las diferentes externas y plataformas de servicio, debe controlar el establecimiento de los Bearers de los diferentes equipos conectados, está formado por tres entidades de red: MME, SGW y PGW, que junto con la base de datos del sistema HSS, constituyen los elementos principales para la prestación de servicios.

Definiremos estas entidades de red: [4]

MME (Mobility Managment Equipment): Es el elemento del plano de control de la red LTE para gestionar el acceso de los usuarios a través de E-UTRAN. Sus principales características son:

- Autenticación y autorización de acceso a los usuarios a través de E-UTRAN.

- Encargada de gestionar la señalización que se necesita para establecer, mantener, modificar y liberar los servicios portadores.
- Gestión de movilidad de los usuarios en modo IDLE (son terminales usuarios que no tienen establecido ninguna conexión de control con E-UTRAN pero están conectados a la red).
- Señalización para el soporte de movilidad entre EPS y otras redes externas.

S-GW (Serving Gateway): Es la pasarela del plano de usuario entre E-UTRAN y la red troncal EPC. Sus características principales son:

- Proporcionar un punto de anclaje en la red EPC con respecto a la movilidad del terminal de usuario entre eNBs.
- Este anclaje también se aplica para la gestión de la movilidad con otras redes de acceso del 3GPP (UMTS y GSM).
- Almacenamiento temporal de los paquetes IP de los usuarios en caso de que los terminales se encuentran en modo idle.
- Encaminamiento de tráfico de usuario. Esta entidad albergará la información y funciones de encaminamiento necesarias para dirigir el tráfico de subida hacia la pasarela P-GW que corresponda y el tráfico de bajada hacia el eNB.

P-GW (Packet Data Network Gateway): Es el encargado de proporcionar conectividad entre la red LTE y las redes externas, las características principales de esta entidad de red son:

- Punto de unión para la gestión de movilidad LTE y redes externas. (WiMAX, WiFi, CDMA2000, etc.).
- Aplicación de reglas de uso y control de tarificación de servicios portadores establecidos en el terminal.
- El tráfico IP que transcurre a través de la pasarela P-GW es procesado a través de un conjunto de filtros que asocian cada paquete IP con el usuario y servicio EPS que corresponda.
- La asignación de la dirección IP de un terminal usada en una determinada red externa se realiza desde la pasarela P-GW que corresponda.

HSS (Home Subscriber server): Es la base de datos principal que almacena los datos de todos los usuarios de la red. La información almacenada contiene todo lo relativo a la subscripción del usuario como lo necesario para la operatividad de la red. Esta base de datos es consultada y modificada desde las diferentes entidades de red encargadas de prestar los servicios de conectividad.

2.2.1.4. IP Multimedia Subsystem (IMS)

Es una infraestructura constituida por una serie de elementos (servidores, base de datos, pasarelas) que se comunicarán entre sí mediante una serie de protocolos, y que nos permiten ofrecer servicios de voz y video sobre IP, videoconferencia, mensajería instantánea, etc.

El modelo de prestación de servicio en base al subsistema IMS se estructura en tres capas: transporte, control y aplicación. [4]

- Capa de transporte: representa la infraestructura de red IP, que depende de la tecnología de acceso, que nos proporciona el encaminamiento de los flujos IP entre terminales y demás elementos de la red.
- Capa de control: aquí se ubican los elementos especializados en la gestión de sesiones, como los servidores SIP (Session Initiation Protocol), así como otros elementos específicos para la interacción con redes telefónicas convencionales (pasarelas VoIP, controladores, etc.).
- Capa de aplicación: en esta capa residen los servidores de aplicación que albergan la lógica y datos asociados a los diferentes servicios proporcionados a través de IMS. En esta capa también se presentan elementos ligados a otras plataformas de servicios como redes inteligentes.

2.2.1.5. Equipo de usuario

La arquitectura funcional de un equipo de usuario es la misma que se definió para GSM y UMTS, el equipo de usuario (User Equipment, UE) contiene dos elementos básicos: un módulo de subscripción del usuario (SIM/USIM) y el terminal móvil propiamente dicho (Mobile Equipment, ME). [4]

Módulo de subscripción de usuario: La SIM/USIM está asociada a un usuario y por tanto es quien le identifica dentro de la red independientemente del equipo móvil utilizado. La separación entre SIM y ME facilita que un usuario pueda cambiar de terminal sin necesidad de cambiar de identidad, de SIM.

El equipo móvil (ME): en él se integran las funciones propias de comunicación con la red celular, así como las funciones adicionales que permiten la interacción del usuario con los servicios que ofrece la red.

2.3. Requerimiento de IMT-Advanced

Es fundamental para LTE-A cumplir plenamente con los requisitos de la ITU, además al ser una evolución de LTE es necesario que cumpla requisitos de compatibilidad con tecnologías anteriores en cuanto a uso del espectro, infraestructura y terminales de usuarios. Los requerimientos de IMT-Advanced publicados en 2008 en el informe M.2134-0 se resumen en la siguiente lista: [5]

- Estar basado en una red conmutada por paquetes de protocolo de Internet (IP).
- Interoperabilidad con los estándares inalámbricos existentes.
- Una velocidad de datos nominal de 100 Mbit/s mientras el cliente se mueve físicamente a altas velocidades en relación con la estación, y 1 Gbit/s mientras que el cliente y la estación están en posiciones relativamente fijas.
- Compartir y utilizar dinámicamente los recursos de red para admitir más usuarios simultáneos por celda.
- Ancho de banda de canal escalable 5-20 MHz, opcionalmente hasta 40 MHz.
- Eficiencia espectral de enlace de cresta de 15 bits/s/Hz en el enlace descendente y 6,75 bit/s/Hz en el enlace ascendente (lo que significa que 1 Gbit/s en el enlace descendente debería ser posible en menos de 67 MHz de ancho de banda).
- Rendimiento espectral del sistema de hasta 3 bit/s/Hz/celda en el enlace descendente y 2,25 bit/s/Hz/celda para uso en interiores.

2.4. Especificaciones técnicas de LTE-Advanced

El 3GPP normalizó LTE-Advanced por primera vez en el release 10 y se desarrolló más en los releases 11 a 13. En noviembre de 2010, la UIT ratificó a LTE-Advanced como IMT-Advanced. LTE-Advanced es una evolución posterior de LTE, una tecnología basada en OFDMA, especificada en el release 8 y 9.

El 3GPP desarrolló las siguientes capacidades para LTE-Advanced con especificaciones en el release 11 y posteriores, que se consideran las funcionalidades más importantes para LTE-Advanced: [6]

- Mayor soporte de ancho de banda para hasta 100 MHz por agregación de bloques de 20 MHz (Agregación de Portadoras).
- MIMO en el enlace ascendente (dos antenas transmisoras en el dispositivo).
- MIMO de mayor orden en el enlace descendente de hasta 8 por 8 en el Release 10.
- Transmisión Multipunto Coordinada (CoMP) con dos enfoques propuestos: programación coordinada y/o formación de haz, y procesamiento/transmisión conjuntos en el Release 11.
- Soporte para red heterogénea (Het-net) incluso con Coordinación Optimizada de Interferencia Inter-celda (eICIC).

LTE-Advanced es una evolución de LTE, por lo tanto, mantiene retro compatibilidad con dicha tecnología y a su vez superando notablemente a su predecesor y a los propios requerimientos de la ITU, dicha superioridad se ve claramente en la Tabla 1.

Tabla 1. Comparativa LTE release 8 y LTE-release 10 obtenida de: [5]

Parameter	LTE Rel8	IMT-Advanced	LTE-Advanced
Maximum bandwidth (MHz)	20	> 40	Up to 100
Peak data rate (Mbps)	>100(DL)/ >50(UL)	1000(low mob)/ 100(high mob)	1000 (DL)/500(UL)
Peak spectral efficiency (bps/Hz) DL/UL	5/2.5	15/6.75	30/15
User plane latency (ms)	10	10	10
Control plane latency (ms)	100	100	50 (idle-active)/ 10(dormant->active)
Average spectral efficiency (bps/Hz/cell) DL/UL	>1.6-2.1/ >0.66-1.0	2.2/1.4	2.6/2.0
Cell-edge user spectral efficiency (bps/Hz) DL/UL	>0.04-0.06/ >0.02-0.03	0.06/0.03	0.09/0.07

2.5. Tecnologías de acceso múltiple

2.5.1 OFDMA

Se utiliza en el enlace descendente, ofrece la posibilidad de que los diferentes símbolos modulados sobre las sub-portadoras pertenezcan a usuarios distintos. OFDMA es la versión multiusuario de OFDM. Se utiliza para lograr que un conjunto de usuarios de un sistema de telecomunicaciones pueda compartir el espectro. El acceso múltiple se consigue dividiendo el canal en un conjunto de sub-portadoras que se reparten en grupos en función de la necesidad de cada uno de los usuarios. [7]

OFDMA se puede describir como un acceso donde repartimos los recursos en el espacio formado por el eje temporal y el eje frecuencial. (Ver detalle de la descripción en la Figura 2). Se asigna la información a lo largo de las sub-portadoras en la combinación del dominio frecuencial y el acceso múltiple en el dominio temporal (espacio tiempo-frecuencia). En pocas palabras lo que OFDMA logra es una asignación de recursos multiplexados tanto en fase como en frecuencia permitiendo el acceso de los usuarios en función del tiempo dependiendo de los recursos que estos requieran.

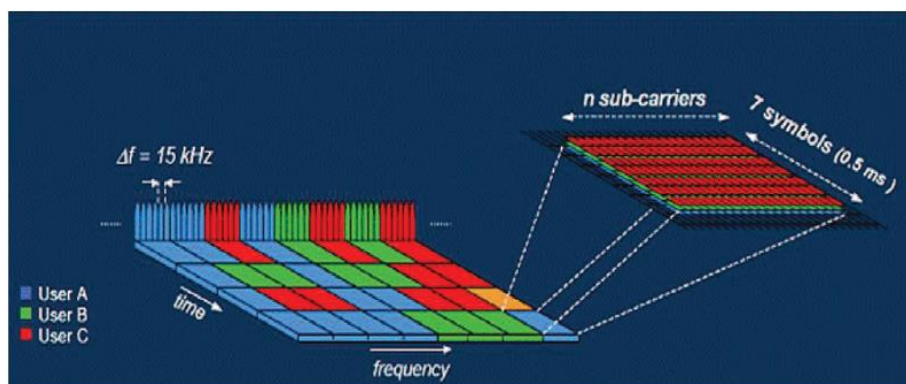


Figura 2. Esquema de transmisión OFDMA obtenida de: [6]

Ventajas de OFMDA: [7]

- Diversidad multiusuario
- Diversidad frecuencial
- Robustez frente al multi-trayecto
- Flexibilidad en la banda asignada
- Elevada granularidad en los recursos asignables
- Elevado grado de utilización de la banda asignada

Desventajas de OFDMA:

- Elevada relación entre la potencia instantánea y la potencia media (PAPR).
- Susceptibilidad frente a errores en frecuencia.

2.5.2. SC-FDMA

Adopta este esquema de modulación en el *uplink* es muy ventajoso para reducir el *PAPR* (*Peak to Average Power Ratio*), factor que mide la relación entre la potencia instantánea de la señal transmitida respecto de la potencia media y por lo tanto permite incrementar la eficiencia de los amplificadores de potencia.

Básicamente lo que se hace en SC-FDMA es que los símbolos en el dominio del tiempo se convierten al dominio de la frecuencia usando la DFT (Transformada Discreta de Fourier); una vez en el dominio de la frecuencia son mapeados a la localización deseada dentro del canal de banda ancha antes de ser convertidos de nuevo al dominio del tiempo usando iFFT (Transformada Rápida de Fourier Inversa). [7]. Como se observa en la Figura 3.

Esta técnica de modulación híbrida, combina la robustez frente a la propagación multitrayecto, y la flexibilidad de ubicación de las sub-portadoras propias de los sistemas OFDM con menor PAPR, propia de las modulaciones con portadora única.

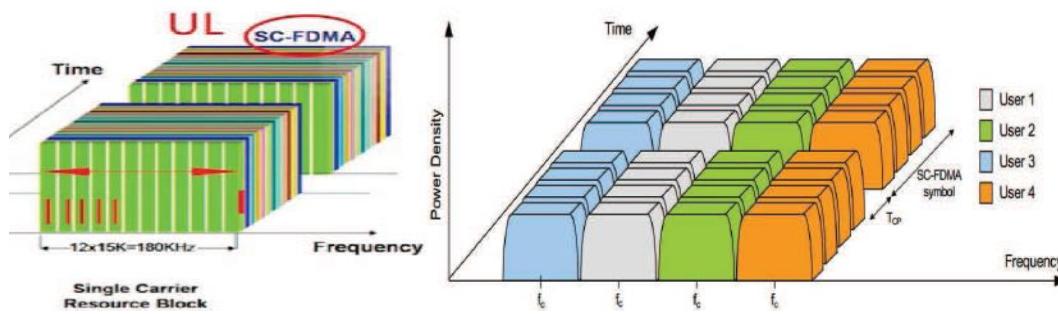


Figura 3. Asignación de recursos en SC-FDMA diferentes usuarios, obtenida de: [6]

2.6. Tecnologías propias de LTE-Advanced

Es necesario destacar que LTE-A es una evolución de LTE por tanto poseen arquitecturas básicamente idénticas. Las principales características de LTE-A que fueron añadidas a LTE en la versión reléase 10 son:

- Agregación de portadora
- Transmisión de múltiple antena Downlink
- Transmisión de múltiple antena Uplink
- Relaying

2.6.1. Carrier Aggregation

La agregación de portadora es una característica muy atractiva para los operadores porque le permite al operador proveer la capacidad de un ancho de banda de 100Mhz, mediante la agregación de componentes más pequeños como (1.4, 3, 5, 10, 15,20), al tiempo que proporciona compatibilidad con versiones anteriores.

Hay tres tipos de diferentes componentes de portadores: [8]

- Backward-compatible carrier: Todos los equipos LTE pueden acceder a este tipo de operador, independientemente de la versión.
- Non-backward- compatible carrier: solo los equipos de usuario LTE-A pueden acceder a este operador.
- Extensión carrier: opera como una extensión de otro operador, se utiliza para proporcionar servicios a eNBs domésticos, donde existen alta interferencia con la macro-celda.

Hay tres tipos posibles de agregación de portadoras: [8]

Intra-Band contigua: Este tipo de agregación se encuentra sobre la misma banda de frecuencia y la señal es procesada, como si fuera una, el equipo de usuario solo requiere un transceptor y es aprovechado al máximo el espectro asignado. El espacio

entre la frecuencia central de dos CC contiguas debe ser múltiplo de 300Khz. Como se presenta en la Figura 4.

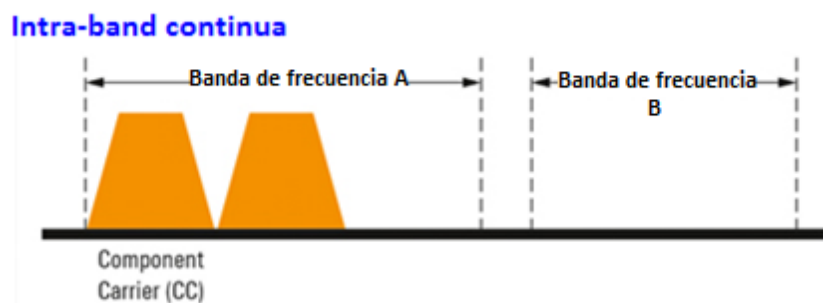


Figura 4. Intra-Banda Continua obtenida de: [7]

Intra-band no contigua: Este tipo de agregación pertenecen a la misma frecuencia de operación, pero con una brecha o separación mucho mayor que la banda contigua. Las portadoras que no son adyacentes y la señal no puede ser tratada como una sola, esto podría añadir complejidad al terminal en el desempeño del consumo de potencia al procesar la señal. Como se presenta en la Figura 5.

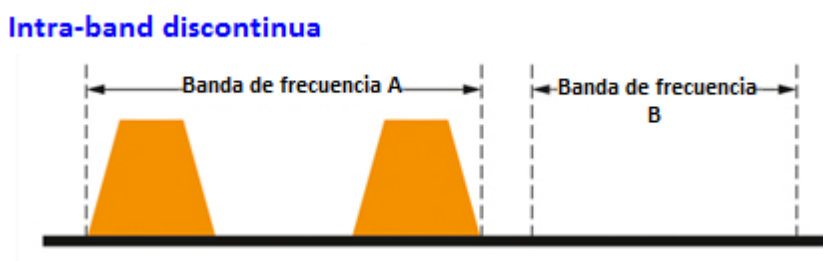


Figura 5. Intra-Banda discontinua obtenida de: [7]

Inter-banda: ofrece mayor flexibilidad en el espectro radioeléctrico y es más atractiva para los operadores móviles debido a que las CCs son agregadas usando diferentes bandas de frecuencia. En este caso el equipo de usuario tendría que usar más transceptores, que impacta en el coste, desempeño y consumo de potencia dado que la señal debe ser procesada en paralelo ya que pertenecen a diferentes frecuencias. Como se observa en la Figura 6.

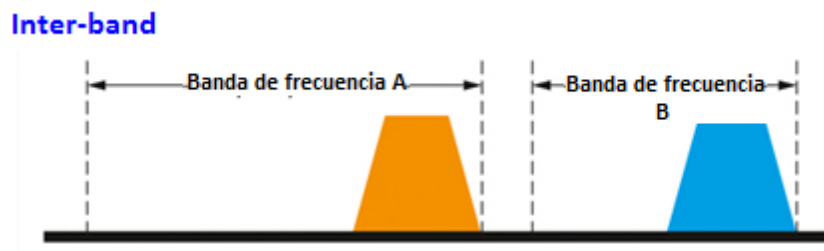


Figura 6. Inter-Banda obtenida de: [7]

2.6.2. Técnicas de múltiple antenas para LTE-Advanced

En LTE-Advanced se introduce el modo TM9 para el Downlink, en tanto el uplink se ha introducido el TM2. Estos modos nos permiten soportar MIMO 8x8 en el DL y 4x4 en el Uplink. En el downlink se mejora SU-MIMO y consecuentemente se incrementan velocidades de transmisión y mejorando MU-MIMO se consigue aumentar la eficiencia espectral. En el uplink se introduce SU-MIMO y mejora la técnica de acceso. Para llevar a cabo estas mejoras se llevan a cabo mejoras en señales de referencia. [9]

La terminología que se usa en LTE cuando se habla de MIMO es:

Codeword (CW); datos de usuario: Representan los datos de un usuario antes de que sean modificados para su transmisión. Se pueden usar uno o dos CWs, (CW0 y CW1) dependiendo de las condiciones del canal.

Layer, stream: Es sinónimo de flujo. En multiplexación espacial al menos dos layers deben ser usadas. En LTE-A se permiten hasta ocho layers. El número de layers es siempre menor o igual al número de antenas.

Precoding: La pre-codificación modifica los flujos de datos antes de la transmisión. Esto puede ser hecho por diversidad o multiplexación espacial.

Transmisión de múltiple antenas Downlink

La transmisión de la información se puede realizar mediante dos técnicas: SU-MIMO y MU-MIMO. En su Su-MIMO la tendencia es usar 8 capas espaciales y un máximo de 2 codewords con 8 puertos de antena porque ello permite mejorar la velocidad de transmisión. [9]. Ver detalles en la Figura 7.

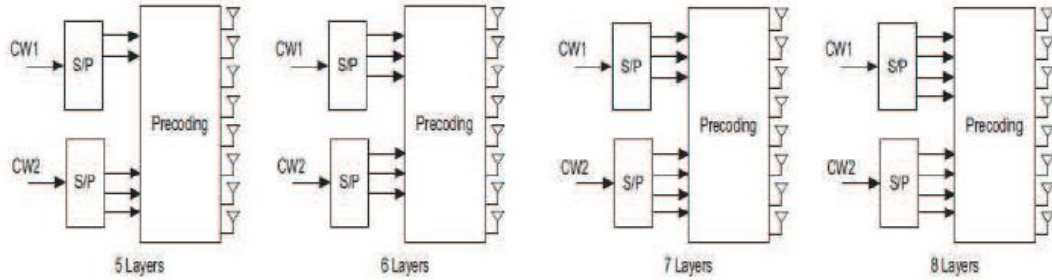


Figura 7. Codewords y layers para 8 puertos de antena obtenida de: [8]

Señales de referencia en downlink

Son usadas por los equipos de usuarios en base a ellas es posible realizar la demodulación de los datos correctamente y la segunda es porque permiten determinar la información del canal de radio. En el downlink existen dos tipos; Demodulation Reference Signal (DMRS) y Downlink Channel State Information Reference Signals (CSI-RS).

Transmisión de múltiple antenas en el Uplink

Se introduce SU-MIMO, esta se realiza en 4 capas espaciales, para incrementar la velocidad de transmisión del canal PUSCH. Se introducen dos modos de transmisión: [9]

- Modo de transmisión 1 PUSCH: transmisión de única antena.
- Modo de transmisión 2 PUSCH: transmisión de múltiples antenas, dentro este modo el UE puede ser configurado para transmitir usando 2 o 4 antenas.

Esquema de acceso mejorado en el UL

Mejora el esquema de acceso, se escogió la técnica Clustered SC-FDMA por la preferencia de OFDM y para evitar incrementos significativos en el PAPR. Esto permitirá satisfacer los requisitos de una incrementada eficiencia espectral y mantendrá compatibilidad con versiones anteriores LTE. [9]

Existen señales de referencias en el UL: Uplink Demodulation reference Signal (DM-RSs) y el Uplink sounding reference Signal (SRSs).

2.6.3. Relaying (red de nodos relay)

Son estaciones base de baja potencia que proporcionan mayor cobertura y capacidad en los bordes de las celdas y áreas de puntos calientes y también se ocupan para zonas remotas sin conexión a fibra. [10]

Los relay nodes comparten funcionalidades con los eNBs, pueden hacer monitoreo y control remoto, (ver figura 8 para ilustración). Un relay node procesa la señal recibida antes de enviarla. Este procedimiento involucra procedimiento de la capa 1, 2, 3.

Hay que tomar en cuenta también que el retardo mínimo producido por un repetidor es bajo comparado con un RN. Un RN tiene dos fases de transmisión para poder entregar la señal recibida del donador eNB al UE.

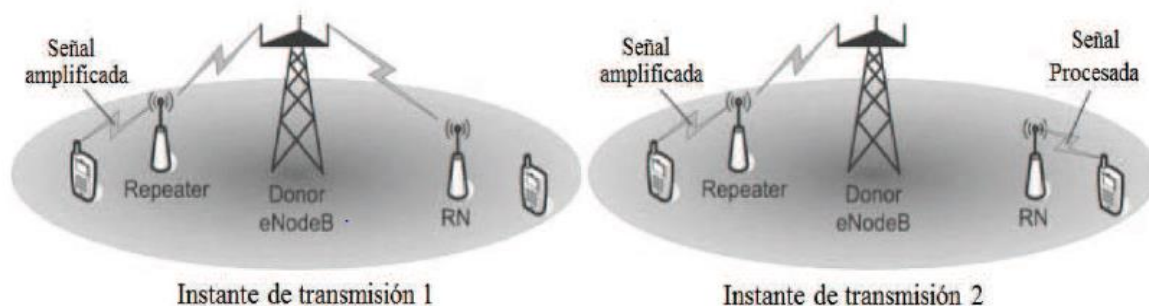


Figura 8. Transmisión y recepción de un repetidor y un relay node obtenida de: [9]

2.7. Interfaz de radio

Las características más importantes del interfaz de radio del sistema LTE, su capa física, el concepto de Physical Resource Block, los diferentes canales de radio asociados a los enlaces y el concepto de reuso frecuencial.

2.7.1 Capa Física

Se basa en la utilización de técnicas de acceso múltiple OFDMA en el descendente (DL) y SC-FDMA en el ascendente (UL). En ambos casos, la separación entre sub-portadoras es 15kHz. En la figura 9, se muestra la canalización del sistema LTE en función del número de sub-portadoras. [11]

Canalización	1,4 MHz	3 MHz	5 MHz	10 MHz	15 MHz	20 MHz
Tamaño FFT	128	256	512	1024	1536	2048
Número de subportadoras disponibles	73	181	301	601	901	1201

Figura 9. Canalización del sistema LTE en función de número sub-portadoras. Obtenida de: [10]

Los posibles esquemas de la modulación para el enlace descendente son: QPSK, 16-QAM y 64-QAM y también para el uplink dependiendo del equipo de usuario.

2.7.2. Physical Resource Block (Bloque de recursos Físicos)

Se denomina PRB (Physical Resource Block), al mínimo elemento de información que debe ser asignado por el eNB a un terminal móvil. Un PRB ocupa 180kHz de banda, equivalente a 12 sub-portadoras equi-espaciadas 15kHz entre ellas. En él se transmiten 6 o 7 símbolos OFDMA, dependiendo de la longitud del prefijo cíclico. La duración de un PRB es de 0.5 ms, es decir, la duración de un slot o ranura de tiempo. En la siguiente Figura 10, se muestra el número de PRB en función de la canalización. [11]

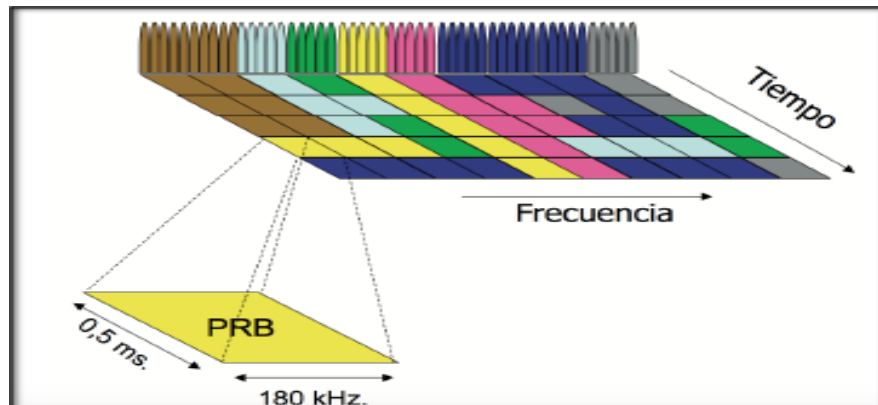


Figura 10. Número de PRB en función de canalización obtenida de: [10]

El número de portadoras disponibles está relacionado con el número de PRBs de cada canal. Por lo tanto, el número de sub-portadoras es 12 veces el número de PRBs más una, ya que se considera la sub-portadora central (la de DC), que no se utiliza para transmitir información. (Ver Figura 11).

Canalización	1,4 MHz	3 MHz	5 MHz	10 MHz	15 MHz	20 MHz.
Número de PRB	6	15	25	50	75	100

Figura 11. Relación canalización número de PRB en sistema LTE obtenida de: [11]

2.7.3. Canales físicos

El estándar LTE no contempla el uso de canales dedicados sino compartidos. Es decir, sólo se establecen cuando un usuario (cualquier terminal móvil) debe recibir datos destinados a él. A continuación en la Tabla 2, y Tabla 3 respectivamente, se presenta una breve descripción de los canales físicos, tanto como en el enlace ascendente como en el descendente. [11]

Tabla 2. Canales Descendentes obtenidas de: [10]

Canales enlace descendente	Descripción
Physical Downlink Shared channel (PDSCH)	Transmite información de usuario, de control tanto dedicado como común (aviso o paging, y de ciertos parámetros de radiodifusión).
Physical Multicast Channel (PMCH)	Se utiliza para transportar información MBMS, destinada a los usuarios unicast en redes isofrecuencias (SFN).
Physical Broadcast Channel (PBCH)	Transporta la información de radiodifusión básica de la red, que permite la conexión inicial de un terminal móvil a la misma.
Physical Downlink Control Channel (PDCCH)	Canal de control genérico del enlace descendente. Informa sobre los recursos en el enlace descendentes asignados al PDSCH.
Physical Control Format Indicator Channel (PCFICH)	Informa al terminal móvil sobre el número de símbolos (1,2 o 3) utilizados para transmitir el PDCCH.
Physical Hybrid ARQ Indicator Channel (PHICH)	Transporta información de reconocimientos (ACK/NACK), correspondientes a las transmisiones del enlace ascendente.

Tabla 3. Canales ascendentes obtenidas de: [10]

Canal ascendente	Descripción
Physical Uplink Shared Channel (PUSCH)	Transmite información de usuario y de control dedicada procedente de capas superior a la capa física.
Physical Uplink Control Channel (PUCCH)	Contiene información de control del enlace ascendente. En particular transmite: peticiones de asignación de recursos (Scheduling Request), Reconocimientos (ACK/NACK) correspondientes al enlace descendentes al enlace descendente, información de la calidad del canal (Channel Quality Indicator-CQI).
Physical Random Access Channel (PRACH)	Canal físico de acceso aleatorio. Envía un preámbulo para iniciar, por parte del móvil, el procedimiento de conexión al sistema.

2.7.4. Reúso de frecuencias

Cualquier técnica que permita reducir las interferencias entre las celdas, se traducirá en mejora en las prestaciones del sistema LTE en términos de calidad de servicio que se puede ofrecer al borde de la celda. Como se muestra en la siguiente Figura 12: [3]

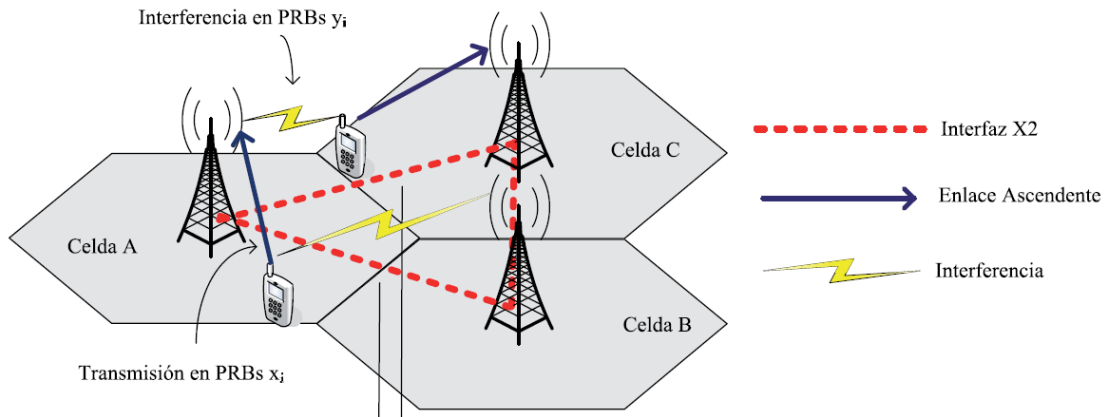


Figura 12. Interferencia Celular obtenida de: [2]

La coordinación de interferencia entre celdas (ICIC), es una técnica integrada en el grupo de funciones del Scheduler mediante el cual se controla el nivel de interferencia que reciben los usuarios en los bordes de la celda para mejorar los parámetros de calidad de servicio en particular su tasa de transmisión. Esta técnica implica aplicar ciertas restricciones en el dominio de la frecuencia, tanto en el downlink como en el uplink, configurando el esquema de reusó de frecuencia distintos para el interior y el exterior de las celdas [3]. (Ver detalle en Figura 13).

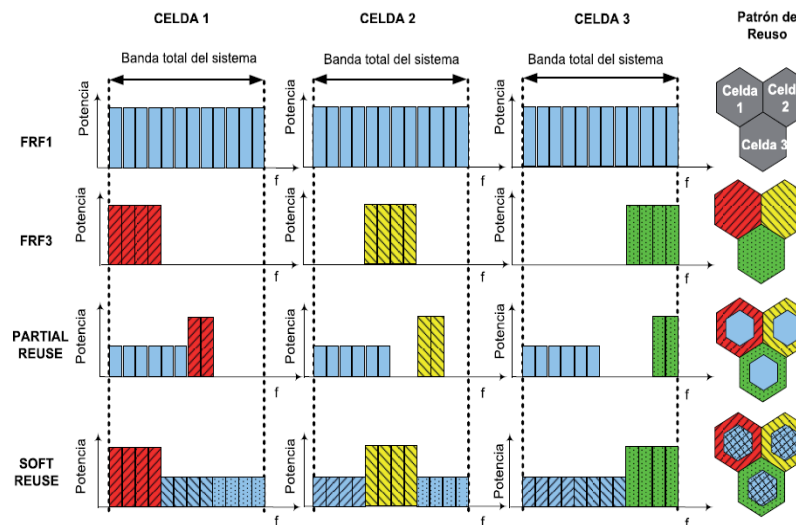


Figura 13. Esquemas de reuso de frecuencias en LTE implementados a través de una estrategia ICIC obtenida de: [2]

Capítulo III. Análisis de parámetros de LTE-Advanced

En este capítulo presentaremos un análisis de los estándares que definen LTE-Advanced release 10, para lograr este objetivo tomaremos como referencia el LTE release 8, del cual en Nicaragua ya existe una infraestructura implementada en el área de estudio, esto nos permitirá definir la superioridad del LTE-Advanced con respecto a su predecesor más cercano mediante un análisis comparativo.

Trataremos de definir las características principales de una tecnología celular, considerando los parámetros más importantes para realizar su descripción, estos parámetros tienen que ver con velocidad de transmisión, ancho de banda, eficiencia espectral, latencia, movilidad, cobertura y capacidad. Realizaremos el análisis comparativo tomando en cuenta los parámetros anteriormente descritos. [12]

3.1. Arquitectura

Ambos release están basados en plataformas IP que se extienden desde el eNB, hasta el EPC. Ambas tecnologías presentan 4 elementos principales que son; el equipo de usuario, el E-UTRAN, la EPC y los servicios brindados a través de IMS e Internet.

Se diferencian que en el LTE-A Release 10, incorpora un elemento adicional, como es el Relay Node (Los relay nodes utilizados en LTE-Advanced, permiten complementar a las macro-celdas incrementando la cobertura y la capacidad de la red, como se muestra en la Figura 14. [4]

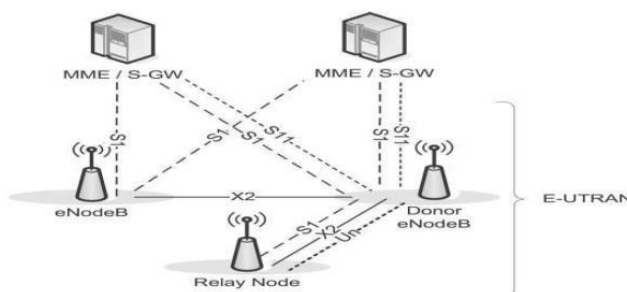


Figura 14. Arquitectura Relay LTE-A obtenida de: [3]

3.2. Bandas de Frecuencias

Las Frecuencias asignadas para tecnologías LTE release 8 y LTE-A release 10, son heredadas de tecnologías previas, esto implica que ambas tecnologías están diseñadas para mantener compatibilidad con tecnologías anteriores. Ambas tecnologías también añaden bandas de frecuencias, el release 8 añade 8 bandas de operación en TDD, LTE-A release 10, añade nuevas bandas de frecuencia debido al uso de más espectro.

En FDD existe un ancho de banda de espaciamento entre el Uplink y el Downlink que es variable, en tanto que, en TDD no existe tal espaciamento. Ver detalles en Tabla 4, [13]

Tabla 4. Bandas de frecuencia asignadas para LTE (negro) y LTE-Advanced (rojo) obtenida de: [12]

Banda de operación	Low [MHz]	High [MHz]	Low [MHz]	High [MHz]	tanto en uplink como en downlink [MHz]	o entre uplink y downlink [MHz]	Modo Dúplex
1	1920	1980	2110	2170	60	130	FDD
2	1850	1910	1930	1990	60	20	FDD
3	1710	1785	1805	1880	75	20	FDD
4	1710	1755	2110	2155	45	355	FDD
5	824	849	869	894	25	20	FDD
6	830	840	875	885	10	35	FDD
7	2500	2570	2620	2690	70	50	FDD
8	880	915	925	960	35	10	FDD
9	1749.9	1784.9	1844.9	1879.9	35	60	FDD
10	1710	1770	2110	2170	60	340	FDD
11	1427.9	1452.9	1475.9	1500.9	25	23	FDD
12	698	716	728	746	18	12	FDD
13	777	787	746	756	10	21	FDD
14	788	798	758	768	10	20	FDD
15	1900	1920	2600	2620	20	680	FDD
16	2010	2025	2585	2600	15	560	FDD
17	704	716	734	746	12	18	FDD
18	815	830	860	875	15	30	FDD
19	830	845	875	890	15	30	FDD
20	832	862	791	821	30	71	FDD
21	1447.9	1462.9	1495.9	1510.9	15	33	FDD
22	3410	3500	3510	3600	90	10	FDD
33	1900	1920	1900	1920	20	0	TDD
34	2010	2025	2010	2025	15	0	TDD
35	1850	1910	1850	1910	60	0	TDD
36	1930	1990	1930	1990	60	0	TDD
37	1910	1930	1910	1930	20	0	TDD
38	2570	2620	2570	2620	50	0	TDD
39	1880	1920	1880	1920	40	0	TDD
40	2300	2400	2300	2400	100	0	TDD
41	3400	3600	3400	3600	200	0	TDD

3.3. Esquema de modulación

Los esquemas utilizados en ambas tecnologías son: QPSK, 16QAM, 64QAM, Ver Figura 15 para ilustración. La diferencia radica, en el uso de mayor orden espacial que le permite al release 10 aprovechar las transmisiones multi-trayecto que el release 8 no aprovecha.

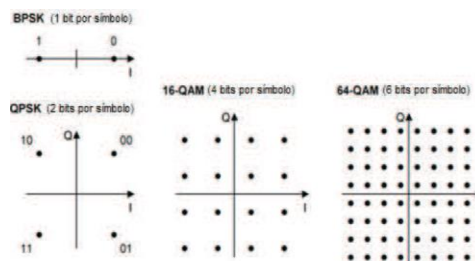


Figura 15. Diagramas de constelación de los esquemas de modulación usados por LTE R8 y LTE-A R10 obtenida de: [14]

Estos esquemas de modulación tienen la capacidad de utilizar una mayor cantidad de símbolos y logran una mayor relación bits/símbolo, llegando a aprovechar el mismo canal en el espectro radioeléctrico de formas distintas dependiendo del estado del canal (SNR) y de los requerimientos de QoS asignados a diferentes servicios, sus respectivos diagramas de constelación se explican de forma conjunta: la distancia entre el punto de origen y cada símbolo se interpreta como la amplitud de la onda mientras que la distancia entre los puntos de diferentes cuadrantes se interpreta como la fase de la onda, esto nos permite entender cómo se realiza la modulación del canal, siendo QPSK una modulación solamente en fase mientras que xQAM modula tanto en fase como en amplitud, aumentando la cantidad de símbolos conforme aumenta el orden del esquema, en Tabla 5 se especifican los detalles de los esquemas de modulación usados en LTE release 8 y LTE release 10 respectivamente. [14]

Tabla 5. Esquemas de modulación usados en LTE release 8 y release 10 obtenida de: [13]

Modulación	QPSK	16QAM	64QAM
Número de vectores	4	16	64
Número de amplitudes	1	3	9
Número de fases	4	12	52
Número de Bits por símbolo	2	4	6

La eficiencia espectral aumenta conforme al orden del esquema de modulación, pero no todo son ventajas, entre mayor es el esquema de modulación se deben cumplir requisitos de SNR para su correcto funcionamiento, esto es debido a la utilización de una mayor cantidad de símbolos, en donde entre más corta sea la distancia entre símbolos más probabilidad hay de error de que un símbolo se interprete como otro diferente al momento de desmodular la señal. Esto se conoce como BER, la cual es una relación entre los bits transmitidos y los bits errados, para mantener una BER de 10^{-7} varían las condiciones de SNR en los diferentes esquemas de modulación, siendo 12dB para QPSK, 16dB para 16QAM y 20dB para 64QAM.

Con esto entendemos que 64QAM es superior en eficiencia espectral (que influye positivamente en la velocidad de transferencia) que QPSK, pero QPSK ofrece una mejor robustez frente al ruido (a cambio y una tasa de transferencia inferior), dicho esto entendemos que para aprovechar al máximo las capacidades implementadas en la red el equipo de usuario debe estar más cerca del eNB como lo muestra la Figura 16.

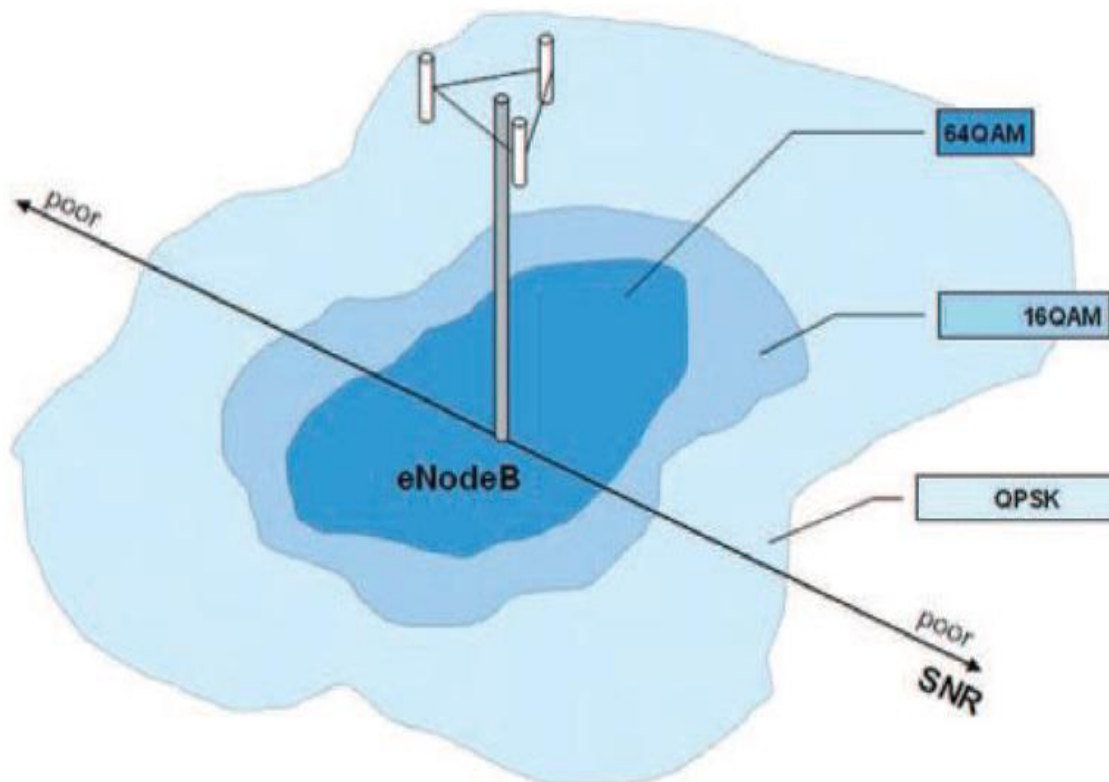


Figura 16. Esquemas de modulación utilizados en función de la SNR obtenida de: [14]

Los esquemas de modulación en dependencia de la calidad del enlace entre el eNB y el equipo de usuario, aunque los saltos entre cada esquema de modulación no se realizan directamente ya que estos a su vez son soportados por diferentes tasas de codificación que de igual forma varían en el tiempo en función del SNR, esta codificación en la transmisión de datos es necesaria ya sea para prevenir o para corregir los errores que se producen en dichas transmisiones, aquí también juega un papel importante la multiplicación espacial (MIMO) ya que reduce la aparición de errores relacionados a la transmisión multi-trayectoria permitiendo que la tasa de codificación sea más baja y aumente la tasa de transferencia [15], Los detalles se encuentra resumido en la siguiente Tabla 6, que podemos ver MCS (Modulation Code Scheme), Spatial streams (flujos espaciales), tipos de modulaciones, los coding rate (information rate), Data rate, G_i , significa (Interval guard), se utilizan para asegurarse de que no interfieren las diferentes transmisiones entre ellas. Estas transmisiones pueden pertenecer a varios usuarios (como en TDMA) o al mismo usuario (como en OFDM).

Tabla 6. Tabla de Esquema de modulación y codificación obtenida de: [14]

MCS index	Spatial streams	Modulation type	Coding rate	Data rate (Mbit/s)			
				20 MHz channel		40 MHz channel	
				800 ns GI	400 ns GI	800 ns GI	400 ns GI
0	1	BPSK	1/2	6.50	7.20	13.50	15.00
1	1	QPSK	1/2	13.00	14.40	27.00	30.00
2	1	QPSK	3/4	19.50	21.70	40.50	45.00
3	1	16-QAM	1/2	26.00	28.90	54.00	60.00
4	1	16-QAM	3/4	39.00	43.30	81.00	90.00
5	1	64-QAM	2/3	52.00	57.80	108.00	120.00
6	1	64-QAM	3/4	58.50	65.00	121.50	135.00
7	1	64-QAM	5/6	65.00	72.20	135.00	150.00
8	2	BPSK	1/2	13.00	14.40	27.00	30.00
9	2	QPSK	1/2	26.00	28.90	54.00	60.00
10	2	QPSK	3/4	39.00	43.30	81.00	90.00
11	2	16-QAM	1/2	52.00	57.80	108.00	120.00
12	2	16-QAM	3/4	78.00	86.70	162.00	180.00
13	2	64-QAM	2/3	104.00	115.60	216.00	240.00
14	2	64-QAM	3/4	117.00	130.00	243.00	270.00
15	2	64-QAM	5/6	130.00	144.40	270.00	300.00
16	3	BPSK	1/2	19.50	21.70	40.50	45.00
17	3	QPSK	1/2	39.00	43.30	81.00	90.00
18	3	QPSK	3/4	58.50	65.00	121.50	135.00
19	3	16-QAM	1/2	78.00	86.70	162.00	180.00
20	3	16-QAM	3/4	117.00	130.00	243.00	270.00
21	3	64-QAM	2/3	156.00	173.30	324.00	360.00
22	3	64-QAM	3/4	175.50	195.00	364.50	405.00
23	3	64-QAM	5/6	195.00	216.70	405.00	450.00
24	4	BPSK	1/2	26.00	28.80	54.00	60.00
25	4	QPSK	1/2	52.00	57.60	108.00	120.00
26	4	QPSK	3/4	78.00	86.80	162.00	180.00
27	4	16-QAM	1/2	104.00	115.60	216.00	240.00
28	4	16-QAM	3/4	156.00	173.20	324.00	360.00
29	4	64-QAM	2/3	208.00	231.20	432.00	480.00
30	4	64-QAM	3/4	234.00	260.00	486.00	540.00
31	4	64-QAM	5/6	260.00	288.80	540.00	600.00

3.4. Velocidad de transmisión

La velocidades de transmisión pico para el LTE release 8 es de 300Mbps (MIMO 4X4, 64QAM, 20 MHz), para el Uplink alcanza 75 Mbps (64QAM, 20MHz), en tanto en LTE-Advanced release 10, alcanza velocidades de 1.2Gbps (MIMO 8x8, 64QAM, 40MHZ), para el Uplink 600Mbps (64QAM, MIMO 4x4, 40MHZ), estas velocidades mencionadas son alcanzadas por un solo usuario. [10]

El ancho de banda en LTE y LTE-A es escalable, pero con la diferencia que en LTE-A release 10, que se puede agregar hasta 5 portadoras convirtiendo su ancho de banda hasta 100MHZ, superando a su predecesor.

3.5. Eficiencia espectral

La eficiencia espectral en el release 8 puede alcanzar en el DL=15 Bps/Hz y en el UL= 3.75Bps/Hz. Para el release 10 se puede alcanzar en DL= 30 Bps/Hz y en el UL=15Bps/Hz. Esto está influido por sistema MIMO de mayor orden y esquemas de modulación. [10]

3.6. Latencia

Tanto como LTE y LTE-A en el plano de usuario y el plano de control es idéntico, ya que ambos sistemas utilizan la misma torre de protocolos en las entidades de red correspondientes y las distintas interfaces que las unen. En el plano de usuario son

muy similares con un retardo de 10ms, mientras que en el plano de control el LTE release 8 propone 100ms, en LTE-A release 10 se propone 50ms. [10]

3.7. Técnicas de múltiple antena

Ambos release basan su funcionamiento en técnicas de multiplicación espacial, técnicas de diversidad en transmisión y técnicas de conformación de haces.

El modo de acceso para el canal de radio en ambas tecnologías se denomina MIMO, y existen distintas configuraciones y modos de operación tanto como en el Uplink como el downlink de cada una. Dependiendo de la tecnología en cuestión se puede hablar de SU-MIMO y MU-MIMO, para los diferentes enlaces, algo que se tiene que tomar en cuenta es que para ambas tecnologías el número máximo de codewords es dos.

En LTE release 8, en el downlink puede soportar un número máximo de 4 layers, con una o dos codewords y hasta un total de cuatro puertos de antenas, es decir, en SU-MIMO la configuración ideal sería 4x4, tanto como en el eNB, como para el UE, pero esta implementación es complicada ya que las características del equipo de usuario no soportan este arreglo, también es posible utilizar MU-MIMO 4x4, en este tipo de arreglo las cuatro antenas se encuentran localizadas en el eNB, mientras que para el UE existen dos opciones, la primera es que de las 4 antenas, dos se encuentran en un UE y dos en otro UE, en la segunda opción cada UE dispone de una única antena. En el Uplink el LTE release 8, SU-MIMO no está especificado en el estándar. MU-MIMO para el UE tiene una sola antena, máximo dos, presentado las siguientes combinaciones 4x4 o 4x2. [16]

En LTE-Advanced está basado en MIMO 8x8 en el Downlink y MIMO 4x4 en el Uplink. A diferencia de LTE, en LTE-Advanced se introduce SU-MIMO con un número máximo de 4 antenas en el UE.

En LTE release 8 existen 7 modos de transmisión basados en técnicas de múltiples antenas para el downlink y con respecto al Uplink trabaja con el TM1. En LTE-Advanced se incrementan a nueve, siendo el fundamental el TM9 para MIMO 8x8, en el uplink utiliza el modo TM2 para operar con MIMO 4x4. Estos distintos modos de transmisión difieren en el número de layers, número de puertos de antena, tipo de señales de referencia y el tipo de pre-codificación empleado. [16]

3.8. Movilidad

La movilidad en ambos sistemas están optimizados para trabajar en velocidades bajas (menores a 15km/h), los parámetros de la conexión disminuyen conforme la velocidad del usuario va aumentando, degradándose a partir de 120km/h a 350km/h, en donde las condiciones para el usuario son desfavorables. [10]

3.9. Cobertura y capacidad

La cobertura en ambos release puede variar dependiendo del entorno en que se implementen (Urbano, Sub-Urbano, rural), con celdas que pueden alcanzar hasta 35km. En cuanto a la capacidad en el reléase 8, en una celda pueden haber hasta 200 usuarios, en el release 10, la capacidad de una sola celda puede alcanzar hasta 600 usuarios, ambos en un ancho de banda de 5 MHz. [10]

3.10. Categoría de equipo usuario

Los equipos de ambas tecnologías son compatibles entre sí, y entre otras tecnologías, esto quiere decir que no hay ningún inconveniente entre distintas tecnologías. La diferencia radica, en que en una red LTE-Advanced, el equipo de usuario LTE release 8 aunque tengan compatibilidad de comunicación, el equipo release 8 no podrá aprovechar toda la velocidad de transferencia de la red LTE-A, ver detalles en la Figura 17. [10]

Algunos ejemplos de equipos que disponen de la red LTE-Advanced release 10, cat.6, son equipos de usuario lanzados entre el año 2014 y 2015, el Samsung Galaxy S6 Edge, Apple iPhone 6s, Huawei Ascend Mate 7, Sony Xperia Z4v E650, Samsung Galaxy A5 SM-A5100, LG G5 Dual H860N, LG V20 H990N, Samsung Galaxy A7 SM-A7100. Los equipos nuevos de estos fabricantes después de estas fechas son compatibles y pueden trabajar en esta red y superar este umbral release 10, 11, 12,13, como por ejemplo el Samsung S9+ y el Iphone XS.

LTE-Release 8 User Equipment Categories



Category		1	2	3	4	5
Peak rate Mbps	DL	10	50	100	150	300
	UL	5	25	50	50	75
Capability for physical functionalities						
RF bandwidth		20MHz				
Modulation	DL	QPSK, 16QAM, 64QAM				
	UL	QPSK, 16QAM				QPSK, 16QAM, 64QAM
Multi-antenna						
2 Rx diversity		Assumed in performance requirements.				
2x2 MIMO		Not supported	Mandatory			
4x4 MIMO		Not supported				Mandatory

(a)

Categorías de UE soportados en el Release 10

	UE category		
	6	7	8
Approximate supported downlink data rate (Mbps)	300	300	3000
Approximate supported uplink data rate (Mbps)	50	100	1500
Number of downlink MIMO layers supported	2 or 4	2 or 4	8
Number of uplink MIMO layers supported	1, 2 or 4	1, 2 or 4	4
Support for 64QAM modulation in downlink	✓	✓	✓
Support for 64QAM modulation in uplink	✗	✗	✓

(b)

Figura 17. Categorías de usuario obtenido de: [9]

3.11. Servicios y aplicaciones

Ambos release se encargan de prestar servicios móviles interactivos y es por ello que estas redes, satisfacen necesidades productivas, comerciales, entretenimiento y comunicación. Ambos tecnologías pueden brindar los mismos servicios y las mismas aplicaciones, la diferencia radica que LTE-Advanced tiene ventaja, porque sus velocidades de transmisión son superiores a las ofrecidas por LTE release 8. [10]

Capítulo IV. Dimensionamiento cobertura y capacidad

4.1. Dimensionamiento de Cobertura

En esta parte de proceso de planificación se estima el número de sitios requeridos para proveer la cobertura deseada en el área urbana de la ciudad de Granada, Nicaragua que se diseñará como red LTE-A. Para poder calcular el número de sitios, se debe calcular el Link Budget o el presupuesto del enlace, el cual nos da una estimación de cuál será la atenuación máxima entre la estación base y el dispositivo móvil y viceversa. Se optó por un dimensionamiento de cobertura tradicional, como se muestra en la Figura 18. También existen otras maneras de realizarlo como por ejemplo el dimensionamiento mediante análisis estadístico interactivo [17].

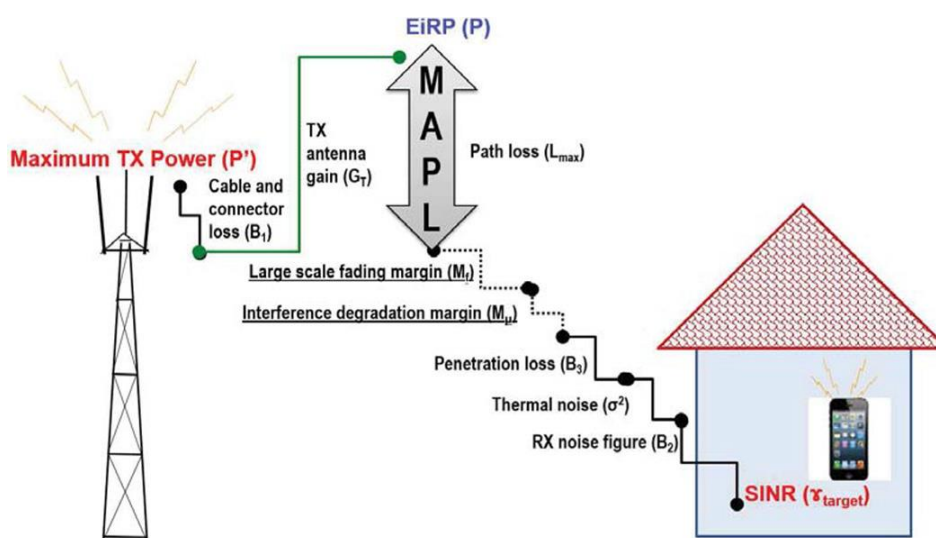


Figura 18. Radio Link budget tradicional obtenido de: [17]

La planeación de cobertura es el elemento más importante de la planificación de redes inalámbricas. Esta planificación nos dará como resultado una pérdida máxima permitida o un valor de atenuación también denominado pérdida máxima de ruta permitida MAPL. Ver detalle de parámetros del sistema, en la Tabla 7.

Tabla 7. Tabla de parámetros estándar del sistema. (Elaboración propia)

Parámetros del Sistema	
Modo	FDD
Frecuencia	1700 Banda 4 (AWS)
Ancho de Banda	20Mhz
Resource Block	100
Altura de la antena base	30 mts
Altura de la antena móvil	1.5 mts
Shadow Fading [18]	8
Penetration Loss [18]	10

Modelo Propagación Cost Hata

El modelo Cost Hata, es un modelo de propagación empírico, basado en medidas realizadas en ambientes específicos. Con este modelo determinaremos el Path Loss:

Fórmula Path Loss obtenido de [19]

$$L(\text{dB}) = 46.3 + 33.9 \log(F_c) - 13.82 \log(h_t) - a(h_r) + [44.9 - 6.55 \log(h_t)] \log(d) + C$$

(Ecuación #1)

$$L(\text{dB}) = 46.3 + 33.9 \log(1700) - 13.82 \log(30) - a(-0.00919) + [44.9 - 6.55 \log(30)] \log(1) + 0$$

$$L(\text{dB}) = 135.38$$

Para zonas urbanas para calcular la correlación de altura: [19]

$$a(h_r) = 3.2(\log_{10}(11.75h_r))^2 - 4.97 \text{ (Ecuación \#2)}$$

$$a(h_r) = 3.2(\log_{10}(11.75(1.5)))^2 - 4.97$$

$$a(h_r) = -0.00919$$

Dónde:

$F_c = 1700$ (Frecuencia)

$H_t = 30$ (altura de la antena base)

$H_r = 1.5$ (altura de la antena móvil)

$a(h_r) = -0.00919$ (correlación de altura móvil)

$C = 0$ (para ciudades de tipo medio y áreas con densidad de árboles moderada)

$D = 1$ (distancia en Km)

Para obtener la relación señal a ruido, que nos servirá para el dimensionamiento de cobertura usaremos una tabla de referencia que es obtenida de la ecuación del límite de Shannon y depende del tipo de modulación y de la razón de código que se emplee, como se muestra en la siguiente Tabla 8.

Con los datos proporcionados en la Tabla 8, nos servirá como una referencia, para calcular la sensibilidad de acuerdo al tipo de modulación deseada.

Tabla 8. MCS (Modulation Code Scheme) SINR obtenidas de: [19]

Uplink (UL)				Downlink (DL)			
MCS Index	TBS Index	Mod & CR	SINR	MCS Index	TBS Index	Mod & CR	SINR
0	0	QPSK 0.1	-4.73 dB	0	0	QPSK 0.117	-3.98 dB
1	1	QPSK 0.125	-3.66 dB	1	1	0.153	-2.68 dB
2	2	QPSK 0.155	-2.61 dB	2	2	0.189	-1.63 dB
3	3	QPSK 0.205	-1.20 dB	3	3	0.245	-0.27 dB
4	4	QPSK 0.25	-0.16 dB	4	4	0.301	0.85 dB
5	5	QPSK 0.31	1.02 dB	5	5	0.37	2.03 dB
6	6	QPSK 0.365	1.96 dB	6	6	0.439	3.06 dB
7	7	QPSK 0.43	2.94 dB	7	7	0.514	4.06 dB
8	8	QPSK 0.49	3.76 dB	8	8	0.588	4.98 dB
9	9	QPSK 0.555	4.59 dB	9	9	0.663	5.84 dB
10	10	QPSK 0.615	5.79 dB	10	9	16QAM 0.332	6.34 dB
11	10	16QAM 0.308	5.79 dB	11	10	0.369	7.14 dB
12	11	16QAM 0.353	6.79 dB	12	11	0.424	8.24 dB
13	12	16QAM 0.4	7.77 dB	13	12	0.479	9.29 dB
14	13	16QAM 0.45	8.75 dB	14	13	0.54	10.40 dB
15	14	16QAM 0.503	9.73 dB	15	14	0.602	11.48 dB
16	15	16QAM 0.535	10.31 dB	16	15	0.643	12.17 dB
17	16	16QAM 0.57	11.93 dB	17	15	64QAM 0.428	13.17 dB
18	17	16QAM 0.63	12.96 dB	18	16	0.455	13.85 dB
19	18	16QAM 0.693	14.01 dB	19	17	0.505	15.06 dB
20	19	16QAM 0.753	14.99 dB	20	18	0.554	16.25 dB
				21	19	0.602	17.40 dB
				22	20	0.65	18.53 dB
				23	21	0.702	19.74 dB
				24	22	0.754	20.93 dB
				25	23	0.803	22.07 dB
				26	24	0.853	23.20 dB
				27	25	0.889	24.03 dB
				28	26	0.926	24.87 dB

A continuación con la Tabla 9 y 10, podremos ver algunos de los valores típicos y otros obtenidos mediante ecuaciones básicas, que nos permitirán obtener los valores de la pérdida máxima permisible para el enlace de bajada (DL), como para el enlace de subida (UL).

Tabla 9. Link Budget para el Downlink. (Elaboración propia)

	Parámetros Downlink	Valores	Ecuación [20]
A	Potencia de transmisión de la antena	43dBm	Valores típicos 43 -48dBm
B	Ganancia de la antena	18dB	Dependiendo del fabricante
C	Cable Loss + Conector Loss	4 dB	Valores típicos entre 1-6 dB
D	EIRP	57dB	A+B-C
E	UE RF. Noise Figure	8dB	Entre 6 -11 dB
F	Thermal noise	-100.70319963	"K (Boltzmann constant) x T (290K) x (20Mhz)"
G	Receiver Noise Floor= E+F	-92.70319963	E+F
H	SINR	5.79 dB	Obtenido de tabla#8
I	Sensibilidad del receptor	-86.91	G+H
J	Shadow Fading	8dB	
K	Penetration Loss	10dB	
L	MHA	2dB	

UPLMAPL ecuación obtenida de [20]

$$DLMAPL = EIRP - SRX + Ga + MHA - J - K(\text{Ecuacion\#3})$$

$$DLMAPL = 57 - (-86.91) + 18 + 2 - 8 - 10$$

$$DLMAPL = 145.91 \text{ dB}$$

Tabla 10. Link budget para el uplink. (Elaboración propia)

	Parámetros Uplink	Valores	Ecuación [20]
A	Potencia de transmisión	23dBm	
B	Ganancia de la antenna	0	
C	Body Loss	0	Datos=0
D	EIRP	23dB	A+B-C
E	Node B noise Figure	4dB	
F	Thermal Noise	-100.70319963	"k (Boltzmann constant) x T (290K) x (20Mhz)"
G	Receiver Noise Floor	-96.7031996	E+F
H	SINR	5.84dB	obtenido de la tabla #8
I	Sensibilidad del receptor	-90.83	G+H
J	Shadow Fading	8dB	
K	Penetration Loss	10dB	
L	Ganancia antena transmisora	18dB	

MAPL ecuación obtenida de [20]

$$\text{MAPL} = \text{EIRP} - \text{SRX} + L - K - J \text{ (Ecuacion\#4)}$$

$$\text{MAPL} = 23 - (-90.83) + 18 - 8 - 10$$

$$\text{MAPL} = 113.83 \text{ dB}$$

Una vez calculado el MAPL procederemos a encontrar el radio de la celda.
Ecuación obtenida de: [21]

$$R = 10^{\left(\frac{\text{MAPL} - L + a(Hr) + C}{B}\right)} \text{ (Ecuacion\#5)}$$

$$R = 10^{\left(\frac{113.83 - 135.38 + (-0.00919) + 0}{44.9 - 6.55 \log(30)}\right)}$$

$$R = 0.95 \text{ km}$$

Donde:

MAPL= Maximum Allowed Path Loss

L= Cost Hata Path Loss

a(hr)= correlación altura móvil

C= 0

B= 44.9-6.55 log (ht)

El área de cobertura de un nodo con tres sectores se calcula de la siguiente manera, ecuación obtenida de: [21]

$$A = 9^2 \sqrt{\frac{3}{8}} \times R^2 \text{ (Ecuacion\#6)}$$

$$A = 9^2 \sqrt{\frac{3}{8}} \times 1^2$$

$$A = 1.57 \text{ km}$$

Con el área de cobertura por eNodeB, el número de nodos necesarios para cubrir el área en estudio de 10km, se calcula mediante la siguiente ecuación obtenida de: [21]

$$\#eNodeB = \frac{AD}{AeNodeB} (\text{Ecuacion\#7})$$

$$\#eNodeB = \frac{10}{1.57}$$

$$\#eNodeB = 6.36 \approx 7$$

Este sería el número de eNodeB para brindar cobertura en el área de estudio.

4.2. Dimensionamiento de capacidad

Este tipo de planeación tiene como objetivo diseñar una red con una larga vida útil, basada en necesidades actuales y futuras proyectadas. Esta planificación nos ayudará a definir el número de celdas necesarias según la demanda de tráfico en el área de cobertura de la zona urbana de la ciudad de Granada, Nicaragua. Ver los datos detallados en la Tabla 11.

Tabla 11. Tabla de parámetros para dimensionamiento de capacidad. (Elaboración propia)

Parámetros a tener en cuenta	
Población en la zona urbana de Granada [22]	138,545
Población económicamente activa (19-60 años) [22]	62,216
Visitas de turistas al año Granada/ turistas al día [23]	1, 134,650/3109
Población activa tomando en cuenta turistas	65235 (50%)
Factor de crecimiento [24]	2.5%
Años proyectados	5 años
Mercado compartido entre operadores	35% (asumiremos que los dos operadores privados tienen participación 35% y 30% en la ciudad de Granada, no tomaremos en cuenta Claro, por el uso de su banda de frecuencia en el trabajo monográfico)
Cantidad de usuarios que poseen LTE [25]	62%
Peak to Average Ratio [26]	20% (Asumido por el Fabricante Huawei en entornos urbanos)

Los pasos para esta planificación son:

Para calcular los usuarios objetivos iniciales de la red lo calcularemos de la siguiente manera, ecuación obtenida de: [26]

$$\Sigma TU = Po \times A \times B \times C (\text{Ecuacion\#8})$$

$$\Sigma TU = 65235 \times 0.50 \times 0.35 \times 0.62$$

$$\Sigma TU = 7,078$$

Dónde:

P_o : población inicial de la zona

A: Usuarios activamente productivos.

B: Cuota de mercado compartido por otros operadores.

C: Cantidad usuarios que poseen LTE.

Cálculo de número de suscriptores de algunos años a futuro. La red diseñada, específicamente para el casco urbano de la ciudad de Granada, debe ser capaz de sustentar el servicio durante los próximos años. Para poder calcular, el número previsto de usuarios en los próximos años se usa la siguiente ecuación, obtenida: [26]

$$P_n = P_o(1 + GF)^N \text{ (Ecuacion\#9)}$$

Dónde:

P_n : Número de usuarios después de N años.

P_o : Número inicial de usuarios.

GF: Factor de crecimiento.

N: Número de años proyectados.

$$P_n = 7,078(1 + 2.5\%)^5$$

$$P_n = 8009 \text{ habitantes}$$

Después de conocer el número total de usuarios en los años proyectados, estos serán los usuarios objetivos a 5 años.

$$\sum TU = 8,009$$

El siguiente paso, es calcular el Throughput por cada servicio que se ofrece en la red, como VoIP, videoconferencia, Web Browsing, FTP Download, Email, Streaming media. Para calcular el Throughput de cada servicio como se ilustra en la Tabla 12, utilizaremos la siguiente ecuación obtenida de: [26]

$$T_{min} = ST \times SDR \times BR \times \left\{ \frac{1}{1 - B_{ler}} \right\} \text{ (Ecuacion\#10)}$$

Dónde:

T_{\min} : Throughput mínimo proporcionado para mantener la calidad del servicio.

ST: Duración media de cada servicio.

SDR: Session Duty Radio.

BR: Bearer Rate, proveída por cada servicio.

BLER: Block Error Rate.

Tabla 12. Proveedor Huawei para los diferentes servicios obtenida de: [25]

Traffic parameter	Uplink				Downlink			
	Bearer Rate(Kbps)	Session Time	Session Duty Ratio	BLER	Bearer Rate (Kbps)	Session Time(s)	Session Duty Ratio	Bler
VoIP	26	80	0.4	1%	26	80	0.4	1%
Video Conference	300	1800	1	1%	300	1800	1	1%
Web Browsing	65.53	1800	0.05	1%	250.11	1800	0.05	1%
FTP	140.69	3600	1	1%	750.34	3600	1	1%
Email	140.69	50	1	1%	750.34	15	1	1%
Streaming Media	31.26	1800	0.05	1%	250.11	1800	0.95	1%

A continuación utilizaremos la Tabla 13 y 14 para poder los resultados obtenidos del throughput por servicio tanto como para el enlace de bajada como para el enlace de subida, auxiliándonos de la Tabla 12, para poder realizar los cálculos para cada servicio.

Tabla 13. Cálculo del Uplink throughput por servicio. (Elaboración propia)

Uplink Throughput por servicio					
Traffic Parameter	Bearer Rate (Kbps)	Session Time (S)	Session Duty Ratio	BLER	Tmin (Kbit)
VoIP	26	80	0.4	1%	823.68
Video Conference	300	1800	1	1%	534,600
Web Browsing	62.53	1800	0.05	1%	5,571.423
FTP	140.69	3600	1	1%	83,570
Email	140.69	50	1	1%	6,964.15
Streaming Media	31.26	1800	0.05	1%	5,571

Tabla 14. Cálculo del Throughput por servicio para el Downlink. (Elaboración propia)

Downlink Throughput por servicio					
Traffic Parameter	Bearer Rate (Kbps)	Session Time (S)	Session Duty Ratio	BLER	Tmin (Kbit)
VoIP	26	80	0.4	1%	823.68
Video Conference	300	1800	1	1%	534,600
Web Browsing	250.11	1800	0.05	1%	22,285
FTP	750.34	3600	1	1%	445,702
Email	750.34	15	1	1%	11,143
Streaming Media	250.11	1800	0.95	1%	445,702

EL siguiente paso es el cálculo del Throughput de un solo usuario para obtener el valor promedio del rendimiento de un solo usuario (SUT) se observa desde la perspectiva del usuario de LTE, el hábito de los usuarios individuales en el uso de los servicios de LTE es muy diverso. El Throughput por usuario calculado durante la hora pico (busy hour BH), es de la siguiente ecuación obtenida de: [26]

$$SUT = \frac{(\Sigma T_{min} \times BHSA \times PR \times (1 + PAR))}{3600} \text{ (Ecuacion\#11)}$$

Dónde:

SUT: Throughput de un solo usuario (Kbps)

Tmin: Throughput mínimo proporcionado para mantener la calidad del servicio.

BHSA: Busy Hour Service Initiation

PR: Penetration Rate of the services

PAR: Peak to Average Ratio.

3600: Marco de tiempo 1 hora (3600 segundos)

A continuación, la Tabla 15, (obtenida del proveedor Huawei), nos sirve como referencia, para calcular el Throughput por usuario en un entorno urbano.

Tabla 15. Proveedor Huawei para entornos urbano: [25]

Entorno Urbano		
Services	Traffic Penetration Ratio	BHSA
VoIP	100%	1.3
Video Conference	15%	0.15
Web Browsing	100%	0.4
File Transfer(FTP)	20%	0.2
Email	10%	0.3
Streaming media	15%	0.15

Tabla 16. Comportamiento del usuario. (Elaboración propia)

Comportamiento del usuario	Uplink	Downlink	Velocidad de datos	
	Tmin (Kbit)	Tmin (Kbit)	Uplink(Kbps)	Downlink(Kbps)
VoIP	823.68	823.68	1,285	1,285
Video Conference	4,475	4,475	14,434.2	14,434.2
Web Browsing	5,571.423	22,284.801	2,674	10,697
FTP	83,570	445,702	4,011.13	21,394
Email	3482	18,571	251	401.148
Streaming Media	27,852.66	401,126.418	150.417	62,576
Total (Kbps)			22,806	71,076.348
Single User Throughput (Kbps) (Total/3600)			7	20

Después de calcular el Throughput por usuario, Procederemos a conocer el throughput total de la red, que lo obtendremos multiplicando el Target user por el throughput de un usuario (Asumiremos que existe una distribución uniforme y que todos los usuarios tienen el mismo Throughput), como se puede observar en la Tabla 16. Con esta ecuación encontraremos el Throughput total en la red con la siguiente ecuación obtenida de: [26].

$$NT = \Sigma TU \times SUT \text{ (Ecuacion\#12)}$$

$$NTDl = 8,009 \times 20$$

$$NTDl = 161,000$$

$$NTUl = 8009 \times 7$$

$$NTUl = 57,000$$

Ahora determinaremos el número de celdas necesarias. La capacidad de cada celda depende del ancho de banda usado, el esquema de modulación, los code rate, y si tienen esquema MIMO, tanto como en DL y UL. La podremos calcular con la siguiente ecuación obtenida de: [27].

$$DLcap = (NRE - NcRE - NrRE) \times (Cb) \times (Cr) \times Nrb \times MIMO \times 1000 \text{ (Ecuacion\#13)}$$

$$UPLcap = (NRE - NrReUL - NrRE) \times (Cb) \times (Cr) \times Nrb \times MIMO \times 1000 \text{ (Ecuacion\#14)}$$

Dónde:

NRE= Elemento total de recursos (RE) en 1 ms (168).

NcRE= Número de control de canales RE en 1 ms (36).

NrRE= Señal de referencia RE en 1 ms (12).

NrReUL= Número de señal de referencia Re en 1 ms en el enlace ascendente (24).

Cb= Code bite Qpsk (2).

CR= Code rate (0.117) downlink, (0.1) Uplink.

NRB = Number of Resource block (100).

MIMO= Número de arreglo de antenas eNBs (8), UE (4).

$$DLcap = (168 - 36 - 12) \times (Cb) \times (Cr) \times Nrb \times MIMO \times 1000$$

$$DLcap = (168 - 36 - 12) \times (2) \times (0.117) \times 100 \times 8 \times 1000$$

$$DLcap(Bps) = 22,464,000$$

$$UPLcap = (168 - 24 - 12) \times (Cb) \times (Cr) \times Nrb \times MIMO \times 1000$$

$$UPLcap = (168 - 24 - 12) \times (2) \times (0.1) \times 100 \times 4 \times 1000$$

$$UPLcap(Bps) = 10,560,000$$

Ahora calcularemos la capacidad del nodo para tres sectores con la siguiente ecuación obtenida de: [21]

$$DLcap = 22,464,000 \times 3$$

$$DLcap = 67,392,000$$

$$UPLcap = 64,944,000 \times 3$$

$$UPLcap = 31,680,000$$

Ahora tomaremos en cuenta las funciones de control y señalización, le restaremos un 35% al total de la capacidad del Downlink y Uplink. [21]

$$DLcap = 43,804,800$$

$$UPLcap = 20,592,000$$

Ahora conociendo la capacidad del nodo, se procede a calcular el número de eNodeB necesarios para satisfacer la capacidad de la red, para eso se emplea la siguiente ecuación obtenida de: [21]

$$NumeNodeBmax = \frac{NTdownlink(Bps)}{DLcapNode(Bps)} \text{ (Ecuacion\#15)}$$

$$NumeNodeBmax = \frac{161,000,000}{43,804,800}$$

$$NumeNodeBmaxDL = 3.7 \approx 4$$

$$NumeNodeBmax = \frac{NTuplink(Bps)}{ULcapNode(Bps)} \text{ (Ecuacion\#16)}$$

$$NumeNodeBmax = \frac{57,000,000}{20,592,000}$$

$$NumeNodeBmaxUL = 2.85 \approx 3$$

Para satisfacer la demanda de tráfico esperado de 8009 usuarios es necesario 4 eNodeB configurado a tres sectores, pero por motivos de cobertura se desplegarán 7 eNodeB calculados en la etapa anterior. En este caso, la cantidad de celdas requeridas para la cobertura excede la capacidad, lo que significa que la capacidad se puede manejar de manera efectiva. [28]

Capítulo V. Condiciones iniciales

5.1. Elección de Atoll™ como herramienta de trabajo

Atoll™ es una plataforma de 64 bits desarrollada por la firma francesa Forsk, que permite diseñar y optimizar redes inalámbricas multi-tecnología y apoyar a los operadores móviles en todo el ciclo de vida de la red, desde el diseño inicial hasta la densificación y la optimización. [1]

Este software ofrece la posibilidad de crear redes con diferentes tecnologías, entre las que se encuentran GSM, CDMA, WiMAX, UMTS y LTE. Cuenta con uno de los mejores módulos LTE disponibles en el mercado de software, que permite implementar con detalle y precisión las características de una red E-UTRAN. Algoritmo de diseño Atoll™ Anexo A, todas sus configuraciones se presentan en los Anexos F, G, H, I, J, K, L.

5.1.1. Predicciones de cobertura

Existen dos tipos de predicciones de cobertura en Atoll™, las que permiten analizar los niveles de señal y las que permiten analizar la calidad de la señal. La primera no depende de las condiciones de carga de la red ni de las interferencias, mientras que la segunda sí. Ver detalles en las tablas 17 y 18. [1]

Tabla 17. Predicción de cobertura por nivel de señal obtenido de: [28]

Clasificación	Nombre	Descripción	Dependencia de tráfico
Por nivel de señal	Cobertura por nivel de señal	Permite predecir las zonas de cobertura según los niveles de señal del transmisor en cada pixel.	No
	Cobertura por transmisor	Permite predecir las zonas de cobertura por transmisor analizando cada pixel del mapa el mejor transmisor.	No
	Zonas overlapping	Permite calcular las zonas donde existe cobertura de dos o más transmisores.	No
	Análisis de señal efectiva	Permite calcular los niveles de señal de diferentes señales LTE	No

Tabla 18. Predicción de cobertura calidad de señal obtenida de: [28]

Clasificación	Nombre	Descripción	Dependencia de tráfico
Por calidad de señal.	Cobertura por nivel $C/(I+N)$	Permite predecir los niveles de interferencia y de portadora a interferencia y ruido $C/(I+N)$ para cada pixel del mapa.	si
	Análisis de área de servicio	Permite calcular y mostrar los mejores Radio Bearers disponibles para cada pixel del mapa basados en las $C/(I+N)$ de los mismos.	si
	Análisis de área de servicio efectiva	Permite mostrar las zonas donde un servicio se encuentra disponible tanto en DL como en UL	si
	Cobertura por Throughput	Permite calcular y mostrar cada pixel del mapa de los Channel Throughputs y cell capacities basados en los niveles de $C/(I+N)$ y en los Radio Bearers disponibles.	si
	Cobertura por indicador de calidad	Permite calcular y mostrar diferentes indicadores de calidad (BLER, BER, etc), basados en los Radio Bearer y en los niveles de $C/(I+N)$ de cada pixel.	si

5.1.2. Simulaciones Monte Carlo

Estas simulaciones en Atoll™ corresponden a una foto instantánea de la red para una distribución de usuarios dada. Los principales outputs de las simulaciones son la distribución geográfica de los usuarios con sus respectivas demandas de tráfico, la asignación de los recursos a cada uno de los usuarios simulados y las cargas de tráfico de las celdas. [1]. Algoritmo de simulaciones Monte Carlo Anexo B

Determinación del mejor servidor: Por cada usuario generado, se realiza el cálculo base a los niveles de señal de cada transmisor que brinde cobertura en ese punto, seleccionando aquella con la que tenga mayor potencia de señal recibida.

Determinación del área de servicio: Por cada usuario generado se determina si se encuentra dentro del área de cobertura de su mejor servidor.

Cálculo de enlace descendente: Se procede a calcular $C/(I+N)$ de los canales de referencia del enlace descendente: SS, PBCH, PDSCH, PDCCH, por cada terminal generado por pixel en el mapa. De acuerdo a los niveles de $C/(I+N)$ del canal PDSCH,

se asigna el mejor servicio portador (Bearer), para posteriormente conceder los respectivos recursos de radio de acuerdo a los parámetros de tráfico configurados y calcular la eficiencia de canal por usuario.

Cálculo de enlace ascendente Se determina el $C/(I+N)$ de los canales de referencia del enlace ascendente: PUSCH, PUCCH y se realiza un control de potencia con la finalidad de reducir la interferencia en el enlace en mención. El cálculo de la eficiencia de canal por cada usuario se define por los recursos de radios asignados de acuerdo a las mediciones de señal del $C/(I+N)$ de los canales de PUSCH y PUCCH.

Resultados: De acuerdo a los valores del Incremento de ruido y su valor máximo en el enlace ascendente por cada transmisor, se realiza el control de potencia en UE para que sean considerados en las próximas iteraciones de la simulación.

5.2.1. Creación de un nuevo proyecto ATOLL™

Para crear un proyecto en Atoll™, partiendo de plantillas pre-cargadas en el software y que poseen parámetros específicos dependiendo de la tecnología seleccionada, para nuestro caso trabajaremos con LTE. Como se ve en la Figura 19.

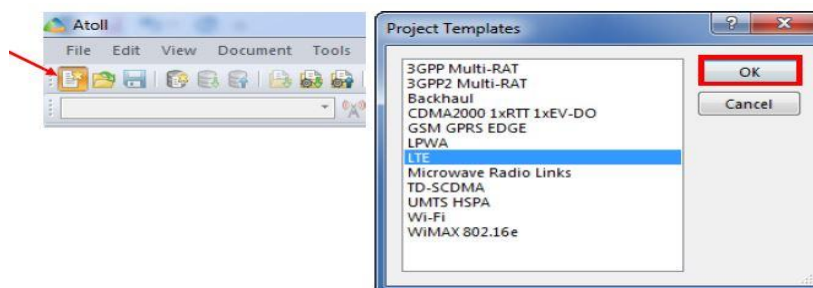


Figura 19. Creación de un nuevo proyecto.

5.2.2. Ubicación de coordenadas área en que se trabajará ATOLL™

Las coordenadas de Nicaragua en este caso son WG84/UTM zona 16N y display WG84. A como se detalla en la Figura 20.

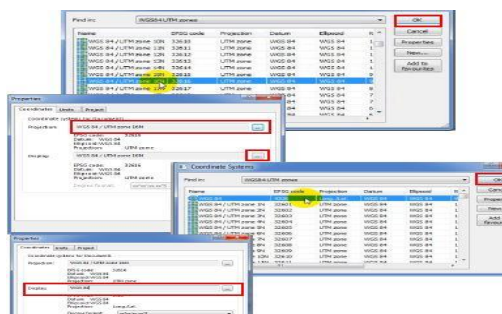


Figura 20. Coordenadas Nicaragua Atoll™

5.2.3. Importar mapas en Atoll™

Se importan los mapas DTM, Clutter class, vector obtenidos. La información de estos nos ayudará a los procesos de predicción y simulación que realiza Atoll™ y genera resultados más exactos ya que considera las variaciones del terreno sobre el que está situado el análisis.

El primer mapa nos muestra los diferentes tipos de zona que componen la zona total, como por ejemplo, si es zona rural, bosque, zona urbana, entre otros. El segundo mapa el DTM es un mapa de relieve de la zona. El tercer mapa es un mapa que contiene datos vectoriales en el que se definen vías, carreteras, aeropuertos, entre otros. En la Figura 21.



Figura 21. Mapas Clutter class, DTM y vector de la ciudad de Granada.

5.2.4. Ubicación de los sitios y creación de sitios en Atoll™

Para poder identificar y situar los puntos de interés donde estarán los eNBs como podemos ver en la Figuras 22, 23, 24, utilizaremos las siguientes herramientas:

- Software Atoll™
- Open Signal: Esta aplicación Android nos da las ubicaciones de las antenas más cercanas de la zona.
- Laptop
- GPS
- Software Google Earth

Para este proyecto tomaremos en cuenta la co-ubicación de los sitios, como uno de los principios de que utilizaremos para el diseño de la red, ya que en la práctica, los diferentes proveedores de servicios como los que ya están instalados y los que van a entrar a operación, utilicen sitios existentes para colocar sus nodos (eNB). En Nicaragua la co-ubicación está contemplada en la ley que regula la ubicación, construcción e instalación de estructuras de soporte para equipos de telecomunicaciones que hacen uso del, aprobada el 27 de junio del año 2013, con el fin de contrarrestar problemas económicos, sociales y paisajísticos que conlleva la construcción de nuevos sitios para redes celulares.



Figura 22. Sitios existentes en google earth.

Name	Longitude	Latitude	Altitude (m)	Comments	Support Height (m)	Support Type	Max S1 interface throughput (DL) (kbps)	Max S1 interface throughput (UL) (kbps)
GN01	85°57'23.9"	11°55'35"N	[48]		50		950,000	950,000
GN02	85°57'6.66"	11°55'24.44"	[58]		50		950,000	950,000
GN03	85°57'59.8"	11°55'8.1"N	[83]		50		950,000	950,000
GN04	85°57'51.5"	11°56'0.4"N	[68]		50		950,000	950,000
GN05	85°56'57.38"	11°56'15.35"	[46]		50		950,000	950,000
GN06	85°57'2.9"W	11°55'43.4"	[42]		50		950,000	950,000
GN07	85°57'23.6"	11°56'35.6"	[57]		50		950,000	950,000

Figura 23. Coordenadas de sitios y creación de sitios en Atoll™

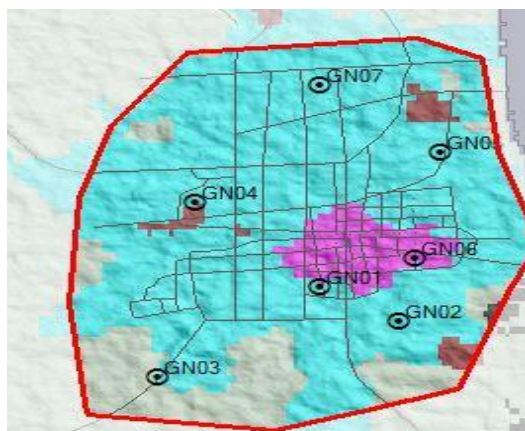


Figura 24. Sitios ubicados en Software Atoll™

5.2.5. Configuración parámetros globales LTE-A

Estos valores son asignados automáticamente por el software como se observa en la figura 25, según la configuración de la trama y los Resource Block en este caso 100 RB.

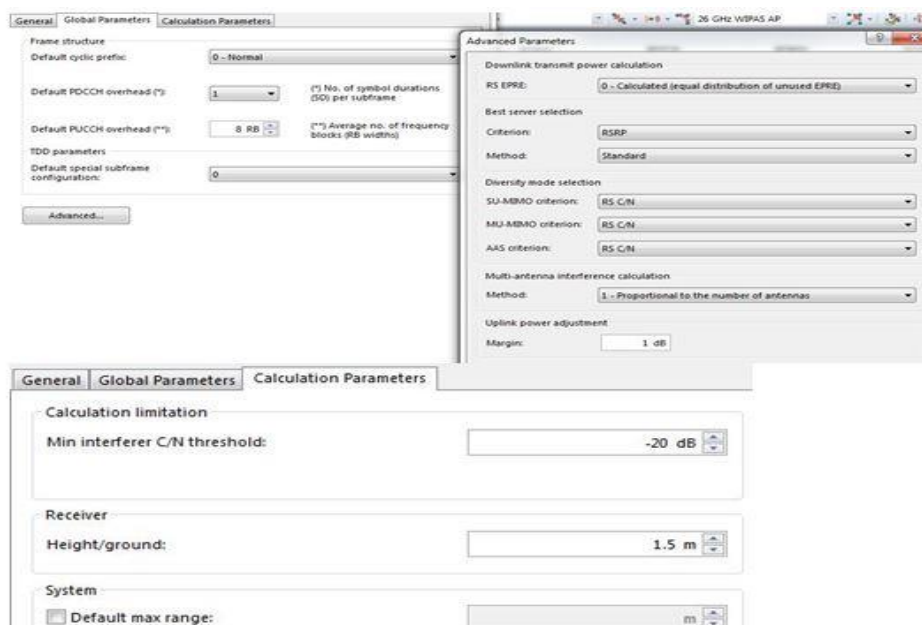


Figura 25. Configuración de parámetros globales.

5.2.6. Elección de banda de frecuencia

Para este trabajo se opta por la banda 4, que es conocida como AWS (Advanced Wireless), ya que en esa banda el ente regulador Telcor la tiene asignada para telefonía móvil, esta banda está asignada a un operador de telefonía móvil comercial Claro de Nicaragua.

Esta banda AWS, esta segmentada por en el acuerdo Administrativo 002-2012 Telcor, en tres bloques. [29] . Como se detalla en la Tabla 19. Anexo C (A) y C (B)

Tabla 19. Banda 4 AWS segmentación Telcor obtenido de: [29]

Bloque	Rango de frecuencia		Ancho de banda	Modulación
	Uplink	Downlink		
A	1710-1730	2110-2130	2x20Mhz	FDD
B	1730-1750	2130-2150	2x20Mhz	FDD
C	1750-1770	2150-2170	2x20MHZ	FDD

Se escoge una técnica de duplexado FDD. Esto se debe a que con esta técnica se obtiene mayor eficiencia, espectral y resultados que con TDD, ya que FDD utiliza partes separadas del espectro para el enlace ascendente y descendente. A continuación se presentaran los parámetros de canalización que debemos tener en cuenta, se detallan en la Tabla 20 y en la Figura 26.

Tabla 20. Parámetros de canalización para tener en cuenta obtenido de: [10]

Channel bandwidth (MHz)	Number PRB	Number of occupied subcarriers	IDFT(Tx)/ DFT(Rx) size	Sample rate (MHz)	Samples per slot
1.4	6	73	128	1.92	960
3	15	181	256	3.84	1920
5	25	301	512	7.68	3840
10	50	601	1024	15.36	7680
15	75	901	1536	23.04	11520
20	100	1201	2048	30.72	15360

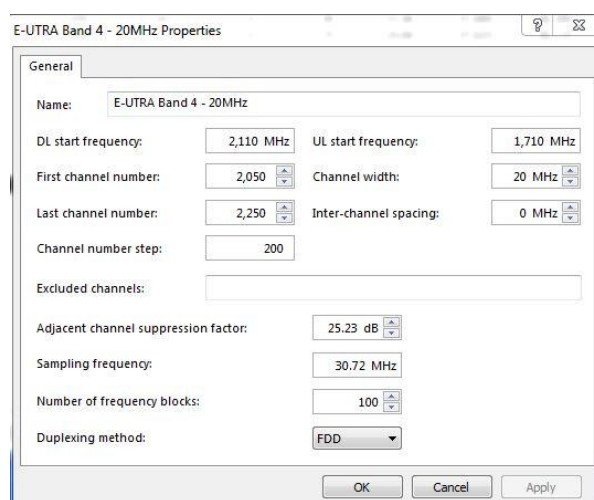


Figura 26. Elección de banda de frecuencia en Atoll™

5.2.7. Elección de modelo de propagación

Observando las características de los modelos de propagación que nos proporciona Atoll™, en nuestro caso utilizaremos el modelo de propagación Standard Propagation Model (SPM), porque es considerado muy bueno en término de pérdidas por trayecto en todos los terrenos tanto urbano, suburbano y rural en las bandas de LTE y también ocuparemos este modelo de propagación por la frecuencia a la que vamos a trabajar la AWS 1.7Ghz

El SPM es un modelo (deducido a partir de la formula Hata), diversos estudios corroboran que es muy adecuado para GSM900/1800, UMTS, CDMA2000, WIMAX y LTE [30]. Este modelo utiliza el perfil del terreno, los mecanismos de difracción y tiene en cuenta las clases de ocupación del suelo (Clutter) y las alturas efectivas de las antenas con el fin de calcular la pérdida de trayectoria (Path loss).

$$LSPM (dB) = K1 + K2 * \log d + K3 * \log hteff + K4 * DiffractionLoss + K5 * \log d * \log hteff + K6 * hreff + Kclutter * (clutter) \text{ (Ecuacion\#17)}$$

Dónde:

- K1: Constante offset (dB)
- K2: Factor multiplicador para log(d)
- d: Distancia entre el receptor y el transmisor (m)
- K3: Factor multiplicador para log(hteff)
- hteff: Altura efectiva de la antena transmisora (m)
- K4: Factor multiplicador para cálculos de difracciones, K4 debe ser un número positivo
- DiffractionLoss: Pérdidas por difracción a través de un trayecto obstruido (dB)
- K5: Factor multiplicador para log(d)log(hteff)
- K6: Factor multiplicador para hreff
- hreff: Altura de la antena móvil (m)
- Kclutter: Factor multiplicador para f(clutter)
- f (clutter): Promedio de las pérdidas ponderadas debido a clutter

5.2.7.1 Calibración de modelo de propagación

En un software de RNP, es importante realizar la calibración del modelo de propagación de tal manera que los parámetros estén lo más ajustado posible al entorno determinado para que la predicción sea precisa, obteniendo los valores aproximados a la realidad de cobertura, capacidad y disponibilidad de la red.

Para realizar esta calibración el software Atoll™, requiere contar con mediciones de campo (Drive Test) ANEXO D, con los siguientes parámetros latitud, longitud y niveles RSPR, ver detalle en la Figura (27 y 28), nosotros lo haremos de esta manera con la

aplicación G-NetTrack, que es una aplicación Android, un monitor de prueba para redes UMTS/GSM/LTE/CDMA/EVDO. Permite el monitoreo de la información de las celdas vecinas sin utilizar equipo especializado. Es una herramienta que puede ser utilizado por profesionales para obtener una mejor visión de la red o por entusiastas para obtener más información sobre las redes inalámbricas.

Esta aplicación permite medir el nivel, la calidad y la frecuencia de las celdas, para 4G se detectan SNR, CQI y avance en el tiempo. También hay otras maneras de realizar calibración mediante el uso de método que utiliza operación matricial para calibrar el modelo SPM. [31]

Para calibrar el modelo de propagación, primero tenemos que importar los logs files .txt, que obtuvimos de G-Net-Track al software Atoll™, tendremos que ir a las configuraciones de la red, ir a CW Measurements, dar click derecho e importar las mediciones de sitios para cada, los logs files tenemos que definir las variables X, Y, Measurements, como se muestra en la figuras 27 , que son las necesarias para calibrar, el modelo de propagación y también vemos en la otra figura el drive test realizado en las zonas céntrica importado Atoll™, en la figura 28 y su calibración final.

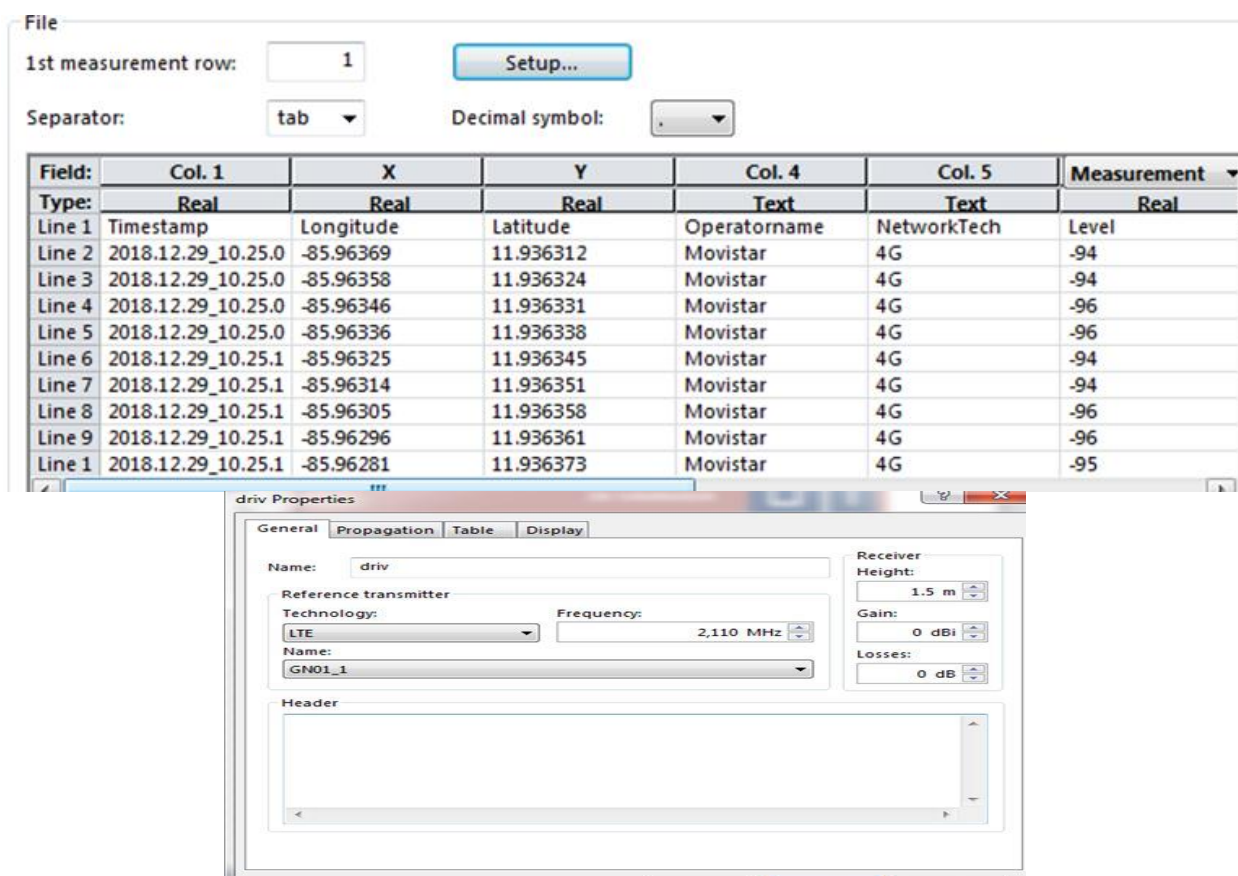
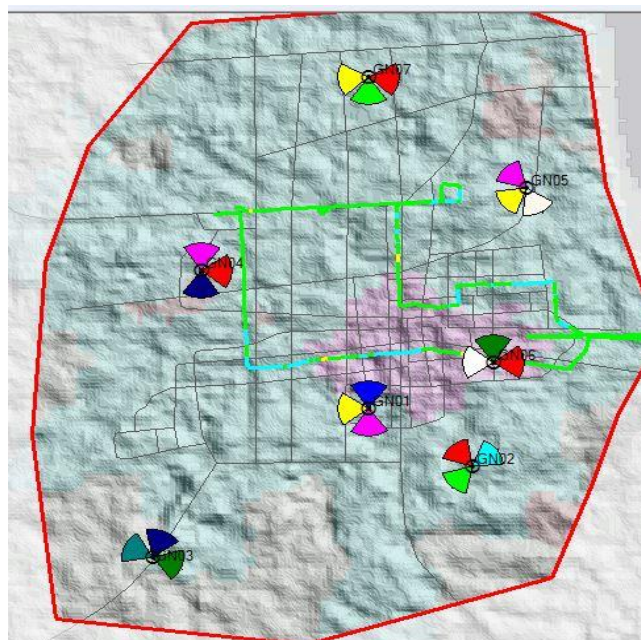


Figura 27. Calibración inicial.



Calibration Wizard

Results:

Parameter	Description	Before	After
HTx method		Height above the ground	Abs spot Ht
Diff. method		Deygout	Deygout
K1 (LoS)		17.4	100
K1 (NLoS)		17.4	99
K2 (LoS)	log(D)	44.9	20.1
K2 (NLoS)	log(D)	44.9	20
K3	log(HTx)	5.83	12.8
K4	Diffraction	1	0
K5	log(D)*log(HTx)	-6.55	-10

Statistics:

	Before	After
Root mean square	23.625	14.377
Mean error	-11.236	0.098
Standard deviation	20.783	14.376

Figura 28. Calibración del modelo de propagación SPM antes y después y drive test de los sitios en Atoll™.

5.2.8. Elección y configuración de la antena

Para este proyecto se ha decidido utilizar el modelo de antena RRZZ-65B-R4 del proveedor Commscope (Ver detalles en las Figuras (29 y 30). Esta elección se hace porque estos modelos de antena admiten MIMO, esquemas de modulación avanzada y agregación de portadora. Además el proveedor nos ofrece los parámetros reales de la antena, que podemos importar al software mediante un archivo .txt, para una predicción más real, como la ganancia, rango de frecuencias de operación, patrones de radiación, etc.

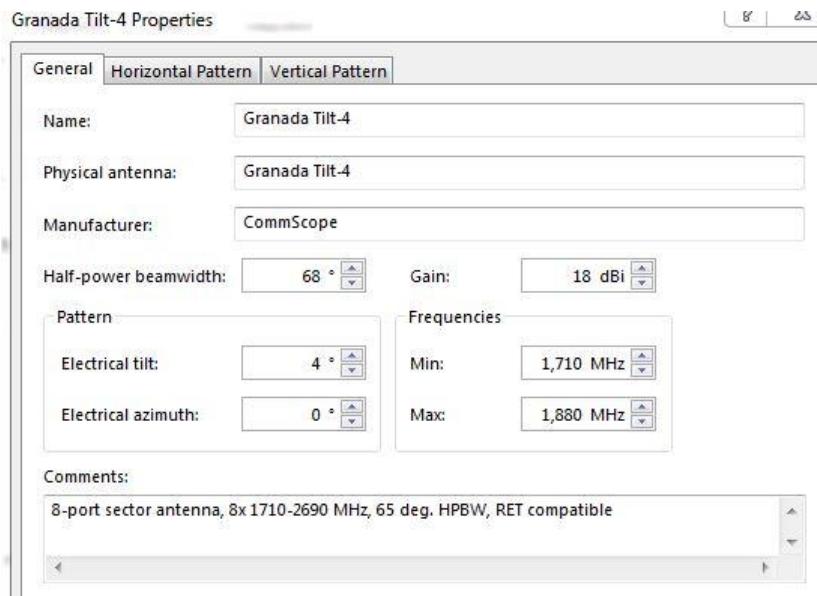


Figura 29. Parámetros de la antena.

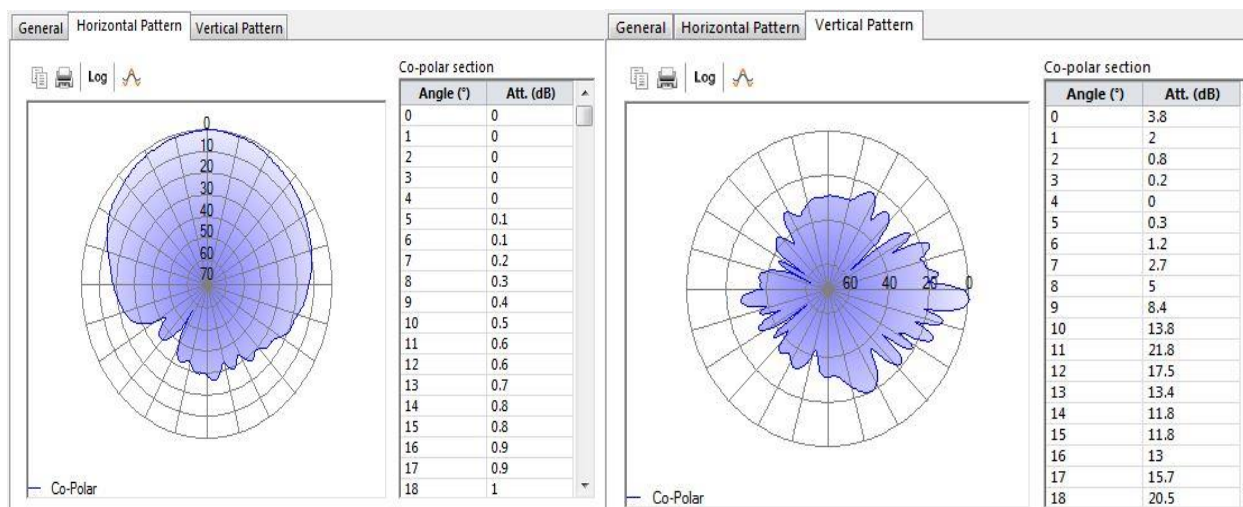


Figura 30. Patrones de radiaciones horizontal y vertical.

5.2.9. Configuración de plantilla del transmisor

Para nuestro proyecto utilizaremos una estrategia de asignación, Proportional Fair (Proporcional y justo), ya que es una estrategia basada en el mantenimiento de un equilibrio entre dos intereses: maximizar el desempeño de la red y permitir a todos los UE al menos un nivel mínimo de servicio. Esta estrategia tiene en cuenta el estado del canal para asignar recursos, priorizando usuarios que tenga mejores condiciones, pero cumpliendo el criterio de justicia proporcional.

Se considera para el enodeB, TMA, Feeder $\frac{1}{2}$ 2100Mhz y equipo de transmisión estándar para el enodeB. La configuración se puede observar en la siguiente Figura 31.

The image displays the 'Banda AWS- Granada Properties' dialog box, which is used for configuring the transmitter and cell parameters. The dialog is divided into several tabs: General, Transmitter, Cell, and Neighbours. The 'Transmitter' tab is currently selected, showing the 'Equipment Specifications' sub-dialog.

Equipment Specifications Sub-dialog:

- Active:** Checked.
- Transmission/Reception:**

Transmission		Reception		Equipment...
Real	Computed	Real	Computed	
0 dB	0 dB	0 dB	0 dB	Detail
Total losses:		5 dB		0 dB
Noise figure:		5 dB		0 dB
- Equipment Specifications:**
 - Both the selected equipment and the user-defined gains and losses are used to initialise the transmitter total UL and DL losses.
 - TMA: TMA Equipment Granada
 - Feeder: Granada 1/2' at 2100 MHz
 - Transmitter: Granada-eNodeB Equipment
 - Feeder length: 3 m
 - Miscellaneous losses: 0 dB
 - Loss related to repeater noise rise: 0 dB

Main Dialog Settings (Transmitter Tab):

- Name:** Banda AWS- Granada
- Sectors:** 3
- Hexagon radius:** 1,940 m
- Transmitter type:** Intra-network (Server and Interferer)
- Antennas:**
 - 1st sector mechanical azimuth: 0°
 - Mechanical downtilt: 0°
 - Electrical azimuth: 0°
 - Electrical downtilt: 6°
 - Height/ground: 30 m
 - Additional electrical downtilt: 0°
- Main antenna:** GRANADA ANTENA COMMSCOPE
- Smart antenna:**
 - Equipment: (empty)
- Number of antenna ports:**
 - Transmission: 8
 - Reception: 8
- Path loss matrices:**
 - Main propagation model: Standard Propagation Model
 - Extended propagation model: Standard Propagation Model
 - Main radius: 2,000 m
 - Extended radius: 4,000 m
 - Main resolution: 20 m
 - Extended resolution: 50 m

Cell Tab Settings:

- Power and EPRE offsets relative to the RS EPRE:**
 - Max power: 43 dBm
 - RS EPRE: 12.7 dBm
 - SS offset: 0 dB
 - PBCH offset: 0 dB
 - PDCCH offset: 0 dB
 - PDSCH offset: 0 dB
- Frequency band:** E-UTRA Band 4 - 20MHz
- Cell definition per sector:** (empty)
- Reuse distance:** (empty) m
- LTE equipment:** Default UE Equipment
- Cell type:** LTE-A PCell
- Min RSRP:** -140 dBm
- Cell selection threshold:** 0 dB
- Cell individual offset:** 0 dB
- Handover margin:** 0 dB
- Scheduler:** Proportional Fair
- TDD subframe configuration:** (empty)
- Antenna diversity:**
 - Downlink: MU-MIMO
 - Uplink: MU-MIMO
- Default loads:**
 - DL traffic load: 100 %
 - Max DL traffic load: 100 %
 - UL traffic load: 100 %
 - Max UL traffic load: 100 %
 - UL noise rise: 0 dB
 - DL noise rise: 0 dB
 - UL noise rise: 0 dB
- Additional interference:**
 - DL noise rise: 0 dB
 - UL noise rise: 0 dB

Neighbours Tab Settings:

- Max number of neighbours:**
 - Intra-technology: 16
 - Inter-technology: 16

Figura 31. Configuración de plantilla eNB transmisores y celdas.

5.2.10. Implementación de MIMO

En un sistema de telecomunicaciones el MIMO se considera toda estrategia que usa más de una antena para enviar y recibir señales. En el software Atoll™ se pueden realizar configuraciones avanzadas que permiten manipular parámetros de transmisión del eNB y de los equipos UE, su configuración se puede ver en la Figura 32.

Modos de transmisión en el eNB transmisión y recepción Se pueden realizar configuraciones MIMO en cuatro escenarios:

- Diversidad de transmisión/recepción
- SU-MIMO
- MU-MIMO
- AMS

Podemos configurar el número de puertos en transmisión y recepción en el eNB.

Utilizaremos técnicas MIMO, se utiliza para aumentar la tasa de bits global a través de dos o más antenas, utilizando los mismos recursos, tanto en frecuencia y tiempo, separados solo por el uso de señales de referencia.

MU-MIMO al contrario de SU-MIMO permite la transmisión y recepción de manera simultánea desde y hacia múltiples usuarios por medio de técnicas y algoritmos avanzados. Con el uso MU-MIMO se puede aprovechar al máximo el ancho de banda del canal, así los UEs pueden conseguir altas tasas de velocidad de datos

Para nuestro proyecto utilizaremos MU-MIMO, aunque ofrece más complejidad, este nos ofrece mejor rendimiento, equilibrio, MU-MIMO aumenta al permitir que un número diferente de corrientes para llegar a cada usuario con el fin de aumentar la tasa de datos promedio de celdas.

Figura 32. Configuración MIMO eNB Tx/Rx

5.2.10.1 Modo de transmisión y recepción en el UE

Nos permite seleccionar las técnicas de transmisión y recepción en el equipo de usuario. Las opciones disponibles son:

- Arreglos de antenas
- MIMO

También nos permite configurar el número de puertos de antenas en el transmisor y en el receptor. Las configuraciones para el equipo de usuario categoría 6 en Atoll™ las podemos observar en la Figura 33.

Figura 33. Configuración MIMO en equipo usuario categoría 6 Tx/Rx

5.2.11. Implementación de agregación de portadoras

La agregación de portadora es la técnica mediante la cual se mejora la eficiencia espectral, soportando tasas de datos de hasta 1 Gb/s en el enlace descendente y hasta 500 Mb/s en el enlace ascendente, usando múltiples (componentes de portadoras). Esta es una de las características que más resaltan en las redes LTE-Advanced, debido a que su implementación mejora la velocidad de los datos, la capacidad de la red y simplifica la gestión del tráfico e incrementa las zonas de cobertura.

Para su implementación en Atoll™ el primer paso será ir a la configuración de plantilla de transmisor donde procederemos a definir dos celdas, en este caso con la misma frecuencia intra-banda, pueden tener diferentes o iguales anchos de banda. Tendremos que definir la primera celda como una celda primaria, secundaria tanto para uplink y downlink y activar la segunda celda, como una celda secundaria LTE/LTE-A /Scell-Downlink y uplink, puede haber hasta 4 celdas secundarias. Después procederemos a la configuración de terminal móvil donde pasaremos a definir los equipos de usuarios activando la casilla de LTE-A con el número de celdas secundarias necesarias para el proyecto tanto como en DL y UL, para que puedan hacer agregación de portadora. El siguiente paso sería configurar todas las predicciones con agregación de portadora para que a la hora de simularlas podamos observar su mejora con la implementación de agregación de portadora. Se detalla su configuración en la Figura 34:

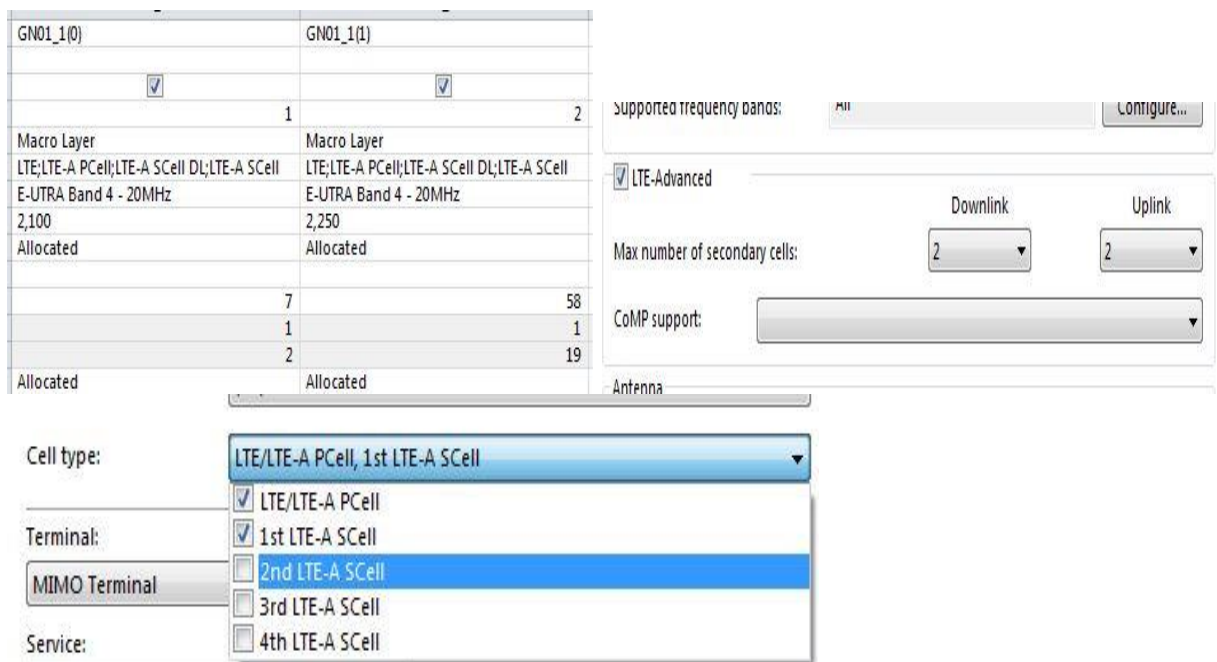


Figura 34. Configuración de agregación de portadora en Atoll™

5.3. Parámetros de tráfico

5.3.1. LTE-A Servicios

Los servicios de comunicaciones móviles, serán tomados en cuenta del dimensionamiento de capacidad, estos serán los servicios que la red va a ofrecer, en este caso en la zona urbana de la ciudad de Granada, Nicaragua, como se detallan en la Figura 35. Estos servicios serán:

1. FTP
2. Video Conferencia
3. VoIP
4. Web Browsing
5. Email
6. Streaming Media

Para todos los servicios de la red se establecen QoS class identifier (QCI, de esta manera los datos de las aplicaciones sean tratados con mayor o menor prioridad dentro de la red. Esto nos garantiza que, por ejemplo, los paquetes de las llamadas de voz cursen la red con el menor retardo y eviten interrupciones por las saturaciones de los enlaces.

Name	Type	Average Requested Throughput (DL) (kbps)	Average Requested Throughput (UL) (kbps)	QoS class identifier (QCI)	Priority (lowest)	Downlink Activity Factor	Uplink Activity Factor	Supported layers	Lowest Bearer (DL)	Best Bearer (DL)	Lowest Bearer (UL)	Best Bearer (UL)
FTP	Data	222,851	83,570		0	1	1 (All)		1	15	1	15
Web Browsing	Data	22,285	5,571.42		0	0.05	0.05 (All)		1	15	1	15
Video Conferencing	Data	534,600	534,600		2	1	1 (All)		1	15	1	15
VoIP	Voice	823,68	823,68		1	0.4	0.4 (All)		1	15	1	15
email	Data	11,143	6,964.15		0	1	1 (All)		1	15	1	15
Streaming media	Data	445,702	5,571		0	0.05	0.05 (All)		1	15	1	15

Figura 35. Configuración de servicios en el software Atoll™

5.3.2. Perfiles de usuario

Para este proyecto se consideran dos perfiles de usuario, tomando en cuenta planes de servicios de los operadores móviles en Nicaragua, como son los Prepago y Postpago. En Nicaragua el servicio dominante es el servicio prepago, para la ciudad de Granada, Nicaragua, asumiremos que el 80% de los usuarios serán prepagos y el 20% postpago, detallado en la Figura 36.

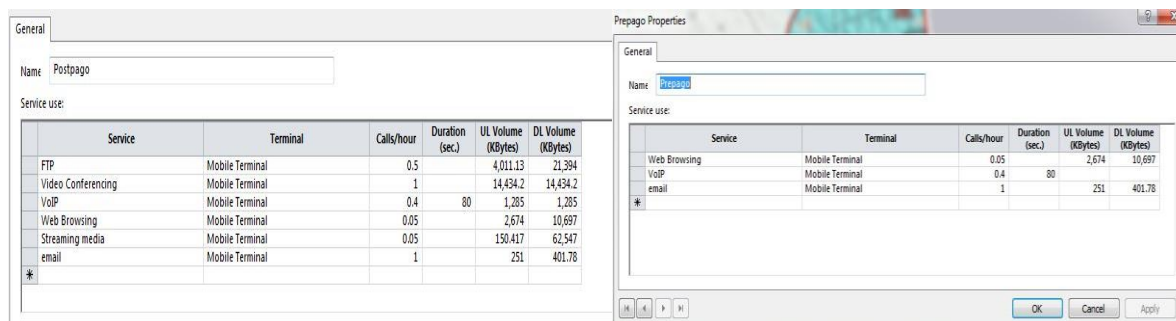


Figura 36. Perfiles de usuario configurados en Atoll™

5.3.3. Terminales móviles

Las categorías definidas para LTE-A por la 3gpp son la categorías 6, 7, 8. Para la ciudad de Granada, Nicaragua, optamos por la categoría 6, sus configuraciones en Atoll™ se detalla en la Figura 37. Cuyas especificaciones técnicas indican que pueden alcanzar velocidades de 300/50 Mbps.

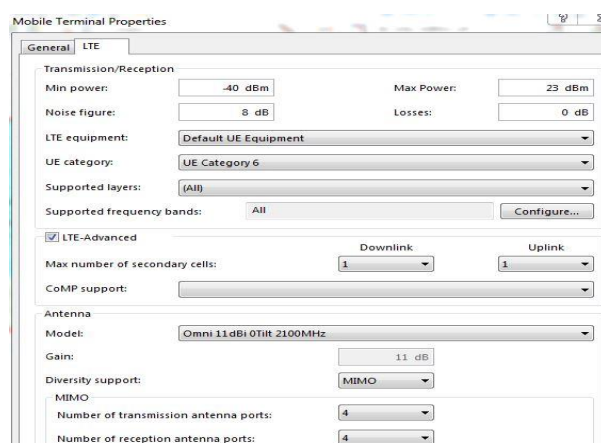


Figura 37. Configuración terminal móvil Atoll™.

5.3.4. Movilidad

Para la ciudad de Granada, Nicaragua, que cuenta con un sistema vial urbano, para este definiremos velocidades máximas de 50km/h, velocidades de 3km/h para usuarios que se desplazan a pie y un perfil estacionario, como se puede observar en la Figura 38.



Figura 38. Configuración de movilidades.

5.3.5. Entornos

Con el software Atoll™ es posible modelar varios entornos (urbanos, rurales, suburbano). Para nuestro proyecto nos enfocaremos en un ambiente urbano. Para esto asumiremos que 80% de los usuarios son Prepago y el 20% son usuarios Post-pago. Para conocer la cantidad de usuarios objetivos tomaremos en cuenta el dimensionamiento de capacidad en el capítulo anterior, donde el total de usuario serían 8009 usuarios, ahora para conocer la densidad de usuarios en Km^2 , dividiremos el total de usuarios en el área de estudio que serían 10km^2 . La densidad de usuario es $809 \text{ usuarios/km}^2$. A continuación se muestra la configuración en el software Atoll™ en la Figura 39.



Figura 39. Configuración de la plantilla entorno en software Atoll™.

5.4. Optimización de la red en el software Atoll™

5.4.1. Asignación de vecinos

La planificación y creación de vecindades es un proceso importante en la fase de optimización de una red móvil. Al tener configurada una lista de vecindades, el usuario dispone de continuidad del servicio y acceso a la red independientemente del estado en que se encuentre el UE. Se denominan vecinos de un transmisor o una estación base a los transmisores o estaciones base cuyas áreas de cobertura se solapan con el área de cobertura de una estación base de referencia.

5.4.2. Planeación de frecuencia

Con el objetivo de reducir la interferencia inter-celular de la red, la herramienta de asignación automática de frecuencias tiene en cuenta matrices de interferencia y distancias de reuso para determinar la asignación de frecuencias y también tiene en cuenta la lista de colindancias (vecinos) por cada celda.

Atoll™ ofrece una herramienta para la asignación automática de vecinos y de frecuencias, como se puede ver en la Figura 40.

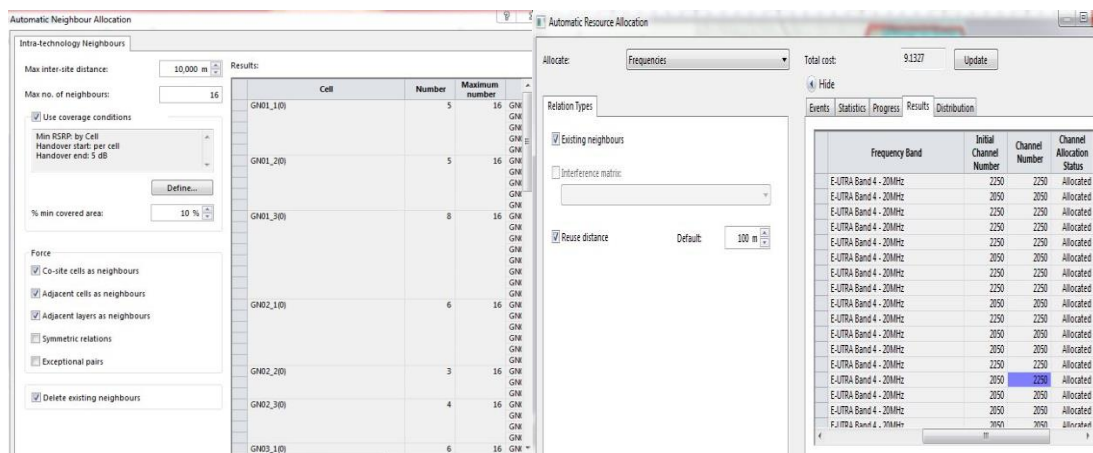


Figura 40. Asignación automática de vecindades y frecuencia.

5.4.3. Planificación de Physical Cell ID

El Physical Cell ID es un número entero que varía entre 0 y 503 cuya función es la de que el terminal sepa identificar cada celda con el objetivo de que este pueda interpretar las señales pseudo-aleatorias de referencia transmitidas por la base y que son usadas por el terminal para determinar la calidad del canal recibido. Además Atoll™ usa el Physical Cell ID para determinar el funcionamiento de los mecanismos de coordinación de la interferencia intercelular (ICIC).

Para facilitar la identificación del Cell ID al terminal, el rango de 504 physical cell IDs se divide en 3 grupos de 168 cell ID. Cada grupo está determinado por el parámetro Primary Synchronization Signal (PSS) ID mientras que cada elemento dentro de un grupo se obtiene del Secondary Synchronization Signal (SSS) ID, que se obtienen en el proceso de sincronización en tiempo y frecuencia del terminal con el sistema.

Se optó por una planificación automática que puede generar Atoll™, a como se muestra en la Figura 41. Esta optimización se hizo ya que, si no se hace una planificación del Physical Cell ID tanto la identificación de celda, como el funcionamiento de la medida de la señal de referencia se ven perjudicadas y con lo cual las simulaciones posteriores se verían comprometidas.

Automatic Resource Allocation

Allocate: Physical Cell IDs Total cost: 0 Update

Hide

Relation Types Constraints

☒ Existing neighbours

☐ Interference matrix:

☒ Reuse distance Default: 100 m

Events Statistics Progress Results Distribution

Initial PSS ID	PSS ID	Initial SSS ID	SSS ID	Cost	SSS ID status
1	1	2	2	0	Allocated
0	0	2	2	0	Allocated
2	2	2	2	0	Allocated
2	2	20	20	0	Allocated
0	0	20	20	0	Allocated
1	1	20	20	0	Allocated
1	1	60	60	0	Allocated
2	2	60	60	0	Allocated
0	0	60	60	0	Allocated
0	0	0	0	0	Allocated
2	2	0	0	0	Allocated
1	1	0	0	0	Allocated
2	2	70	70	0	Allocated
0	0	70	70	0	Allocated
1	1	70	70	0	Allocated
2	2	50	50	0	Allocated
1	1	50	50	0	Allocated

Figura 39. Planificación automática de Physical Cell ID.

Capítulo VI. Predicciones de cobertura

6.1. Análisis de Predicciones de cobertura sin mapa de tráfico

Una vez que se han realizado las configuraciones iniciales para simular un entorno de operación del estándar LTE-A, procederemos a realizar predicciones para ver el impacto que supondría en un entorno urbano, hay que recordar que estas predicciones son con el SPM, calibrado para la zona de Granada, Nicaragua. Primero se realizaran sin tener en cuenta mapas de tráfico, para tener las primeras predicciones de la red. Para poder realizar las demás predicciones necesitaremos tener mapas de tráfico generados por las simulaciones Monte Carlo. Para todas las predicciones tomaremos como referencia el Anexo M.

Para la verificación de la zona de cobertura haremos tres tipos de predicciones.

6.1.1. Predicción de cobertura por transmisor

Con esta predicción permite conocer el área de cobertura del mejor transmisor en cada pixel del mapa.

Esta primera predicción de cobertura por transmisor es necesaria ya que se quiere garantizar que para toda la zona urbana de Granada, en especial para la zona de estudio no exista o no haya ningún punto donde no exista cobertura. Se presentan sus resultados en la Figura 42.

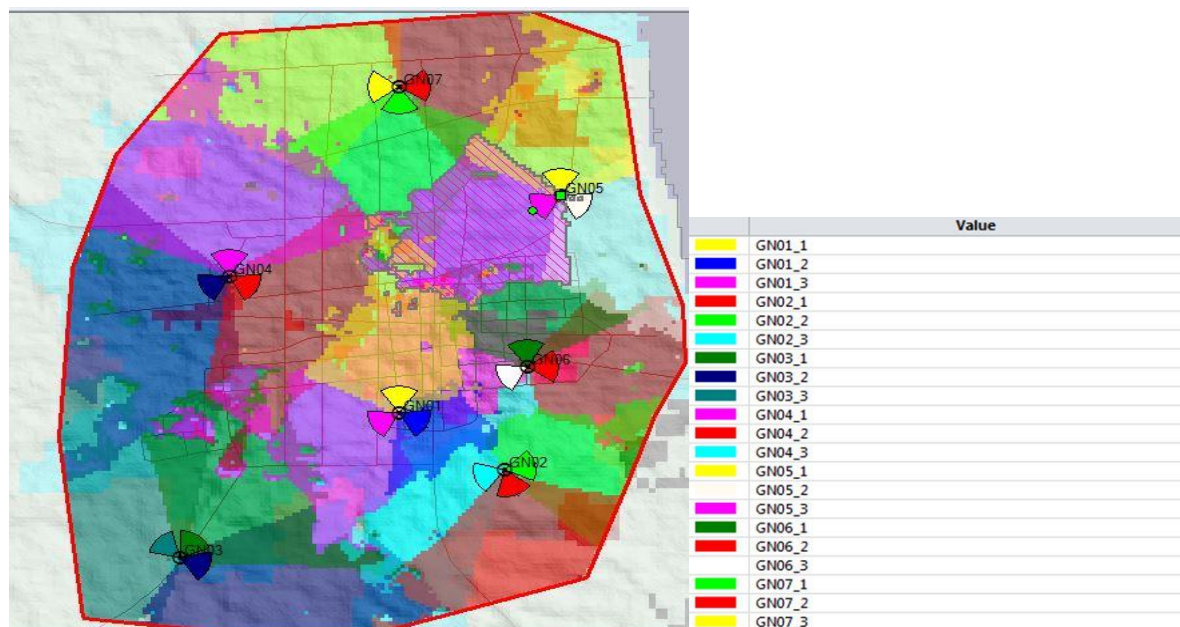


Figura 40. Cobertura por transmisor y códigos de colores por transmisor.

6.1.2. Predicción de cobertura por nivel de señal

El área de estudio para esta predicción es la zona urbana de Granada, Nicaragua. Para este tipo de predicciones se muestra la cantidad de potencia que hay en cada pixel del mapa, sin tener en cuenta a que transmisor pertenece esa potencia, esta es una predicción idónea para visualizar si hay zonas del mapa que no tienen señal o es insuficiente. Los resultados obtenidos los podemos ver en las Figura 43 y 44.

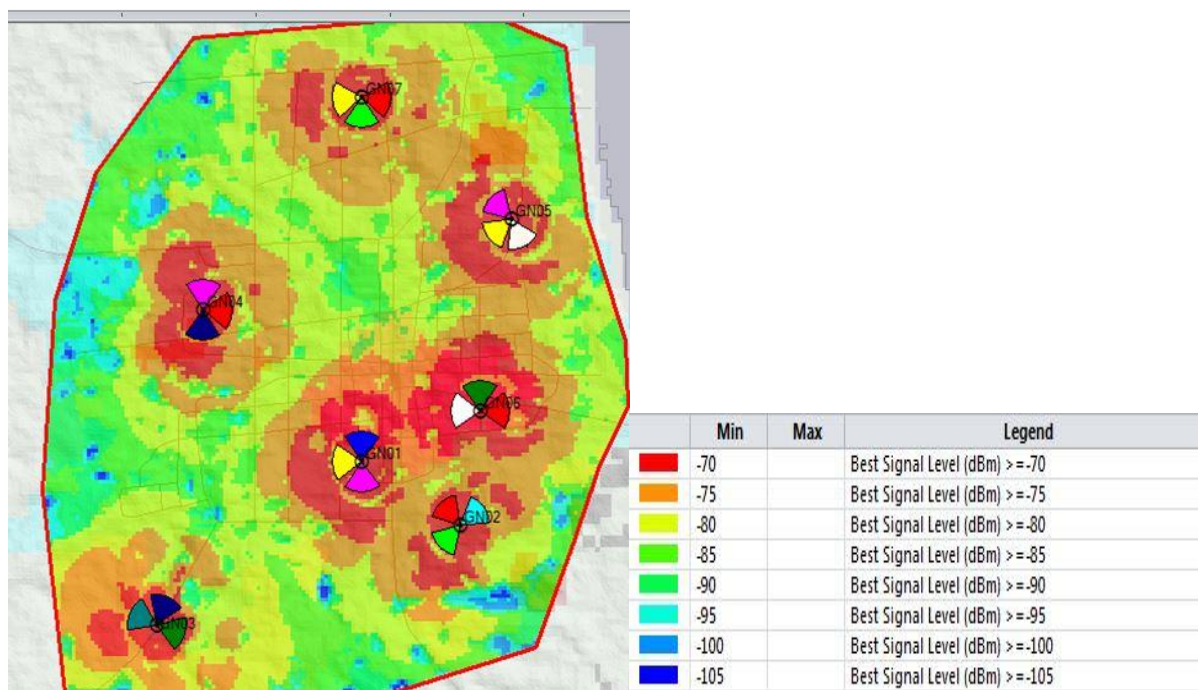


Figura 41. Zona de cobertura por nivel de señal.

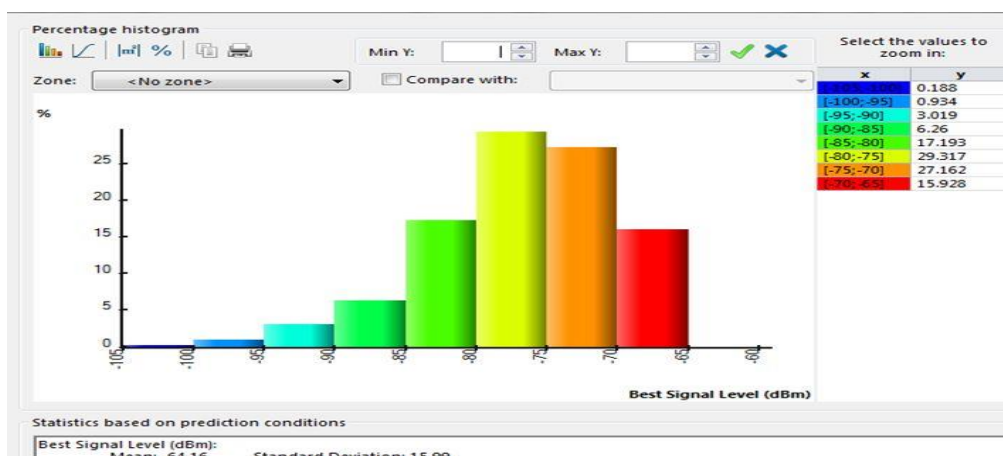


Figura 42. Histograma de cobertura por nivel de señal.

En el siguiente histograma de la figura 44, podemos ver resultados obtenidos de RSRP, tenemos que 43%, son niveles entre -65 a -75dBm, que serían condiciones excelentes,

también tenemos un 57%, entre -75 a -95dBm, estas serían niveles buenos, los niveles entre -95 a -100dBm, son rangos neutrales, se observa que se tiene un 0.9%, después tenemos entre -100 a -105dBm, estos serían los rangos poco aceptables, con 0.1% del mapa

6.1.3. Predicción de Zonas solapadas

Un factor importante a analizar es el solapamiento de las celdas, mientras menor sea el número de servidores en el área de cobertura, menor será la interferencia generada por las estaciones vecinas.

Este tipo de predicción permite calcular las zonas donde existe dos o más transmisor o servidores que están proporcionando nivel de señal en una determinada zona.

Tenemos como resultado de la predicción que 40%, hay overlapping de 1 a 2 transmisores, un 39.3% de 2 a 3 transmisores, un 14% de 3 a 4 transmisores, un 5% de overlapping de 4 a 5 transmisores, un 1% de 5 a 6 transmisores y un 0.5% de 6 a 7 transmisores. Con esto nos podemos dar una idea que si habrá interferencias en las zonas donde hay más de un servidor en ese pixel del mapa o esa zona determinada. Podemos ver sus resultados en la figura 45 y 46.

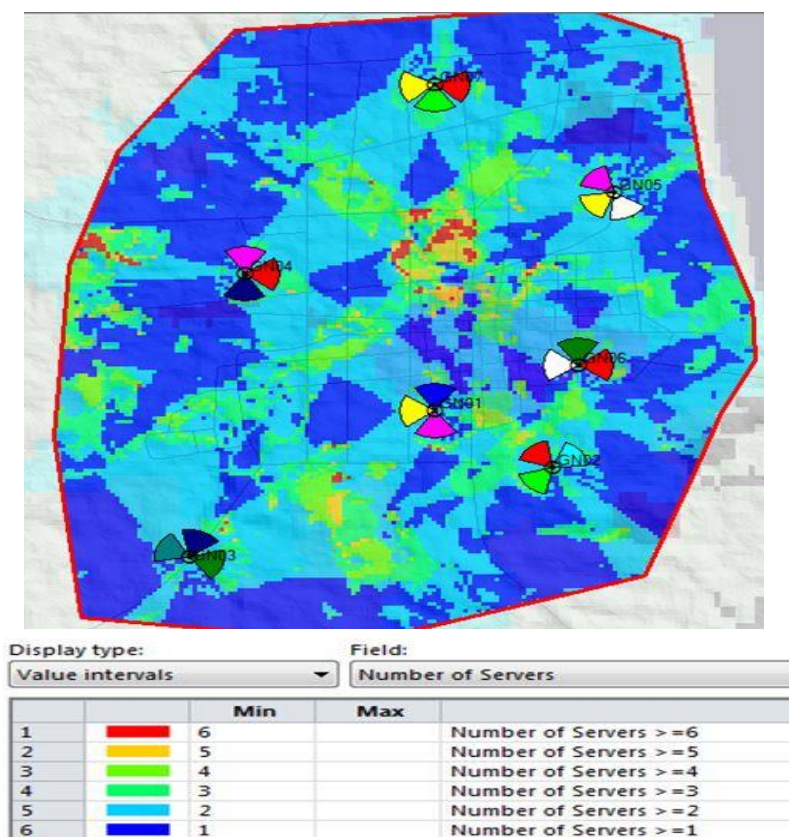


Figura 43. Zonas solapadas.

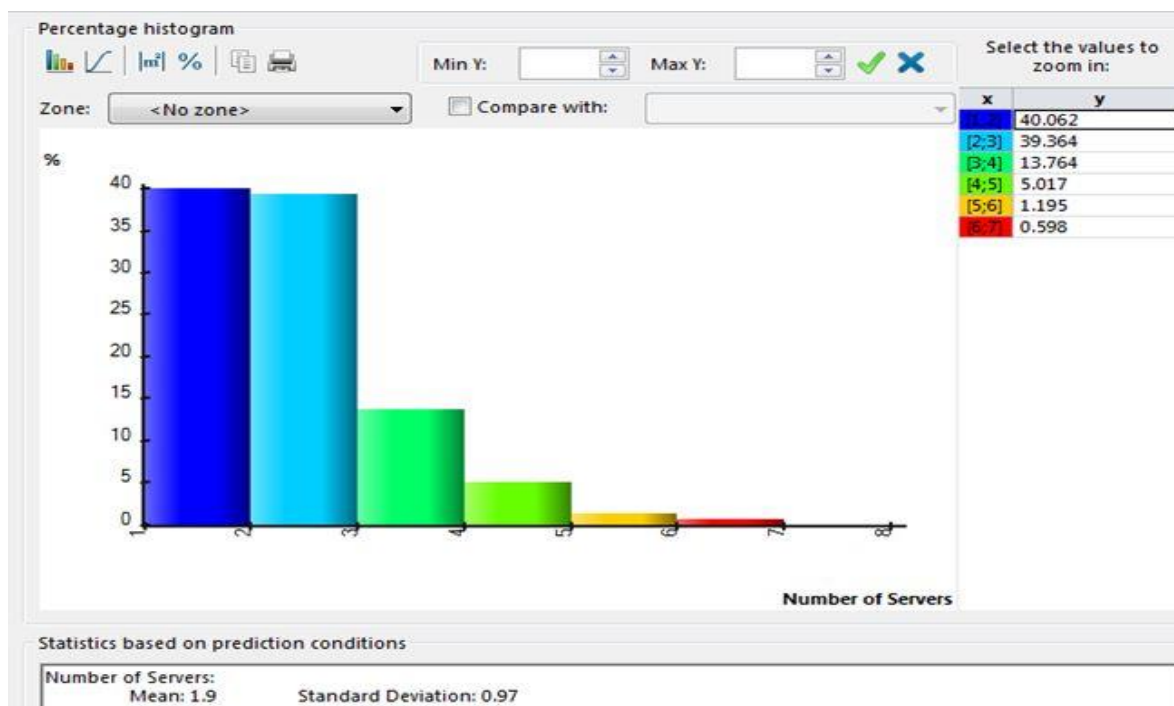


Figura 44. Histograma de zonas solapadas

Para prevenir estas interferencias entre servidores o transmisores se debe realizar una correcta optimización de red, asignando de vecinos, planificación de frecuencias entre otras para prevenir estos incidentes en la red.

6.2. Análisis de predicciones que dependen del tráfico

Estas predicciones de calidad de señal se basan en los valores de los valores de DL Traffic Load tanto en el DL y UL establecidos en las tablas de celdas, o son calculados por simulaciones Monte Carlo, para medir la relación entre portadora a interferencia más ruido, $C/(I+N)$, en cada pixel del mapa.

Para la realización de las predicciones de calidad de señal dependientes de la carga de tráfico, se calcularan utilizando el mapa de tráfico Scaling Factor 1 obtenido en las simulaciones Monte Carlo, que veremos más adelante en el siguiente capítulo. Se tomara en cuenta el Anexo M, para el análisis de los resultados.

Mediante varias simulaciones viendo los resultados que obteníamos, que no eran malos, pero quisimos mejorarlos, optamos por realizar cambios en el azimut en algunas celdas, para esto volvimos a realizar las optimizaciones de red del capítulo anterior, este cambio es para mejorar los resultados obtenidos de estas predicciones para la zona urbana de la Ciudad de Granada, Nicaragua.

6.2.1. Predicción de análisis de servicio en el DL

La Figura 47, nos muestra los resultados de la predicción del PDSCH, esta predicción nos muestra la cantidad de potencia de señal que llega a cada pixel del mapa, la escala de colores para esta predicción mientras más rojo más potencia y mientras más azul menos. En esta predicción se optó por el PDSCH (Physical Downlink Shared Channel) debido a que es una señal de vital importancia ya que transporta datos de usuario y puede transportar información de aviso por parte de la red.

En el histograma para PDSCH, podemos ver los resultados obtenidos, tenemos que un 5% del área - 60 a -75 dBm, estos son niveles excelentes u óptimos en la red, también tenemos un 75% de área con niveles de -75 a -95dB, con niveles buenos, también tenemos un 18%, con niveles de -95 a -100dBm, que serían niveles neutrales en la red y un 2% mayor a -100dBm, estos serían niveles pocos aceptables.

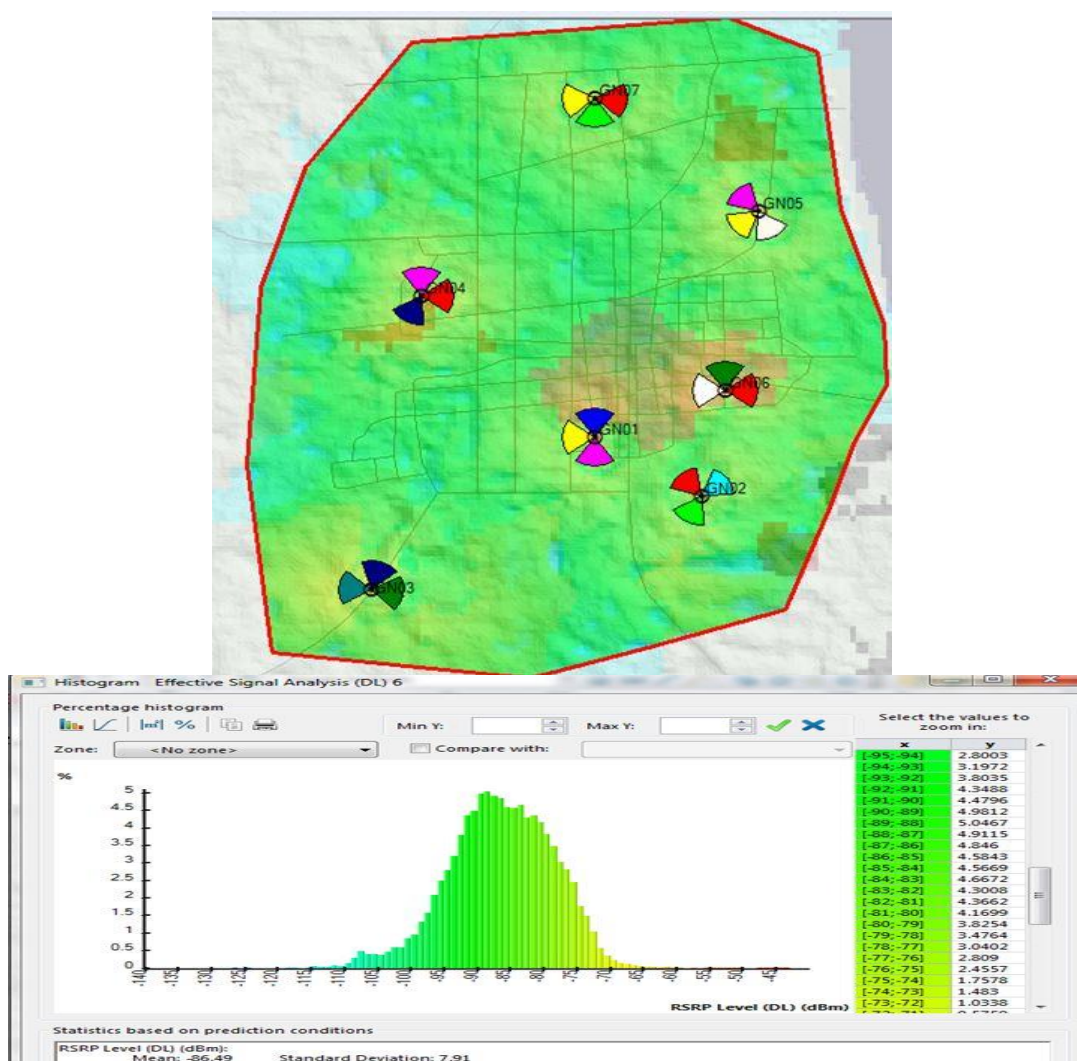


Figura 45. Análisis de servicio en el PDSCH DL e Histograma.

6.2.2. Predicción de análisis C/ (I+N) en el Downlink

La predicción Coverage by C/ (I+N) nos permite conocer para cada pixel del mapa el estado de la señal respecto al ruido y las interferencias. No es propiamente la SNR (Signal to Noise Ratio), sino que añade a ello las posibles interferencias de los transmisores vecinos. Esta predicción muestra en cada pixel del mapa la C/N, relación señal a ruido, para este canal. En el histograma de la figura 48, podemos observar la predicción y los resultados obtenidos de C/ (I+N), para el enlace de bajada, en el mapa podemos observar que hay un 22% de área de cobertura de más de 20dB, estos nos indica que son niveles excelentes, un 26% de área de cobertura de 13 a 20dB, con niveles buenos, un 40% de área con niveles de 0 a 13dB, que es un nivel neutral en la red, y un 12% de área con nivel con niveles menores a 0, que son niveles pocos deseables para la red.

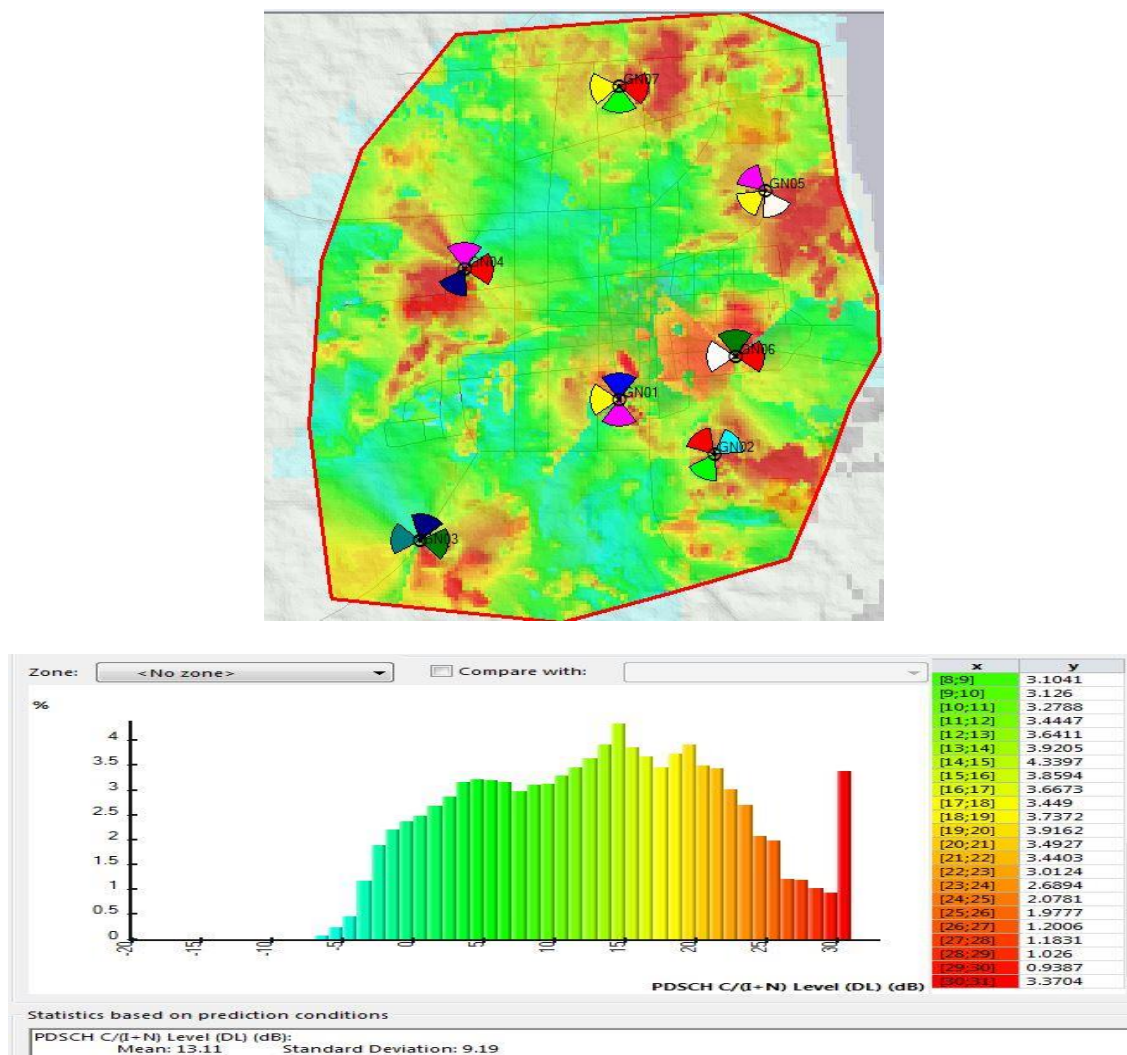


Figura 46. PDSCH C (I+N) DL e Histograma

6.2.3. Predicción de análisis de servicio en el UL

Aquí se muestra los resultados de la predicción para el PUSCH (Physical Uplink Shared Channel) en el enlace ascendente. (Ver detalles Figura 49). Al igual que para enlace descendente, esta predicción nos muestra la cantidad de potencia de señal que llega a cada pixel del mapa. En el histograma podemos observar los resultados para PUSCH, tenemos un 99% del área de estudio con niveles de entre -75 a -95dBm, estos niveles son buenos.

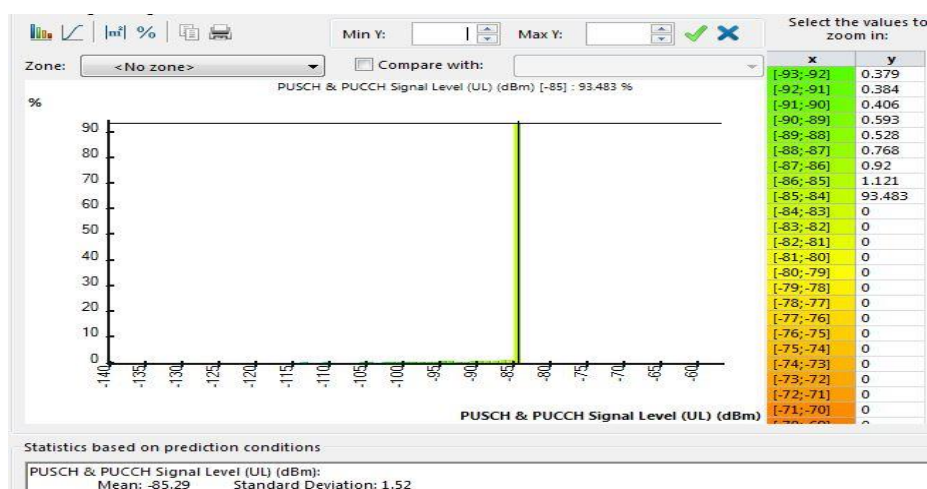
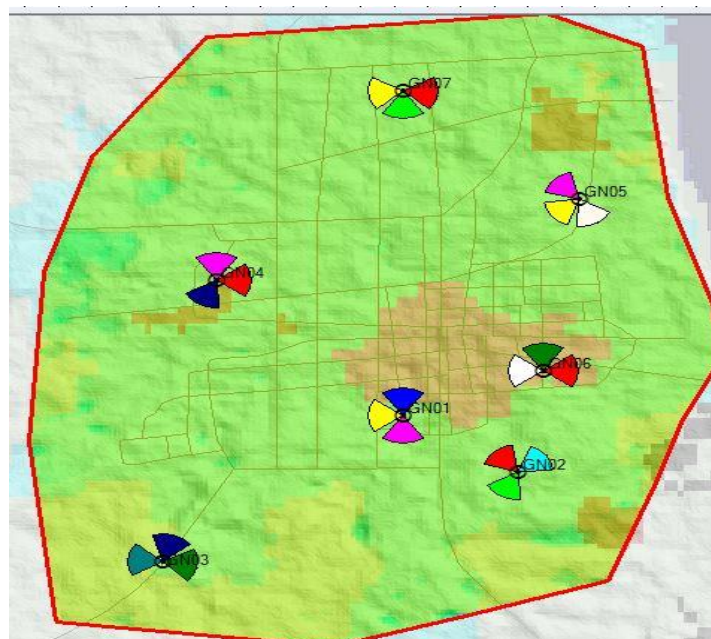


Figura 47. Análisis de servicio en el UL

6.2.4. Predicción de análisis C/ (I+N) en uplink

La predicción Coverage by C/(I+N) nos permite conocer para cada pixel del mapa el estado de la señal respecto al ruido y las interferencias. Al igual que las predicciones anteriores utilizaremos la misma escala de colores. Como se observa en la figura 50 y el histograma, en el histograma podemos ver los resultados de C/ (I+N) para el enlace de subida tenemos niveles de 13dB en un área de 92% de las zonas, que son niveles buenos y niveles de 12 dB en un 8% del área que son un nivel neutral.

En este análisis no existe mucha variación debido a que este análisis depende de la carga de tráfico en el uplink este es menor, debido a que el número de usuarios para el enlace ascendente es mucho menor que para el enlace descendente.

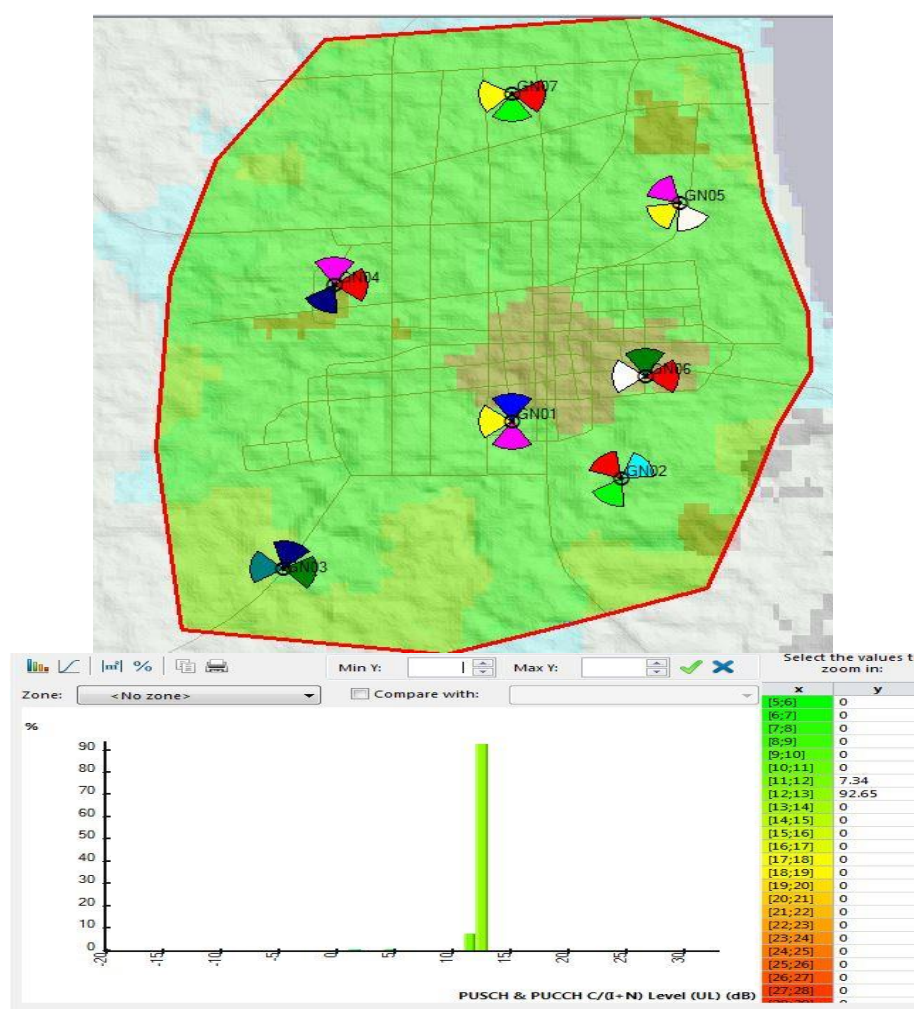


Figura 48. Análisis C/ (I+N) en uplink.

6.2.5. Predicción de análisis de área de servicio en DL

En esta predicción se muestra los mejores portadores disponibles en función de $C/(I+N)$. En cada pixel del mapa está representado por un color el tipo de servicio portador que puede tener el usuario. En la figura 51, podemos observar los radios bearer disponibles en podemos ver que las áreas más cercanas al eNodeB, con una modulación 64QAM es aproximadamente un 51% de cobertura, en las zonas medias con modulación 16QAM, tenemos un 32% y tenemos un 17% de bordes de celdas con modulaciones QPSK.

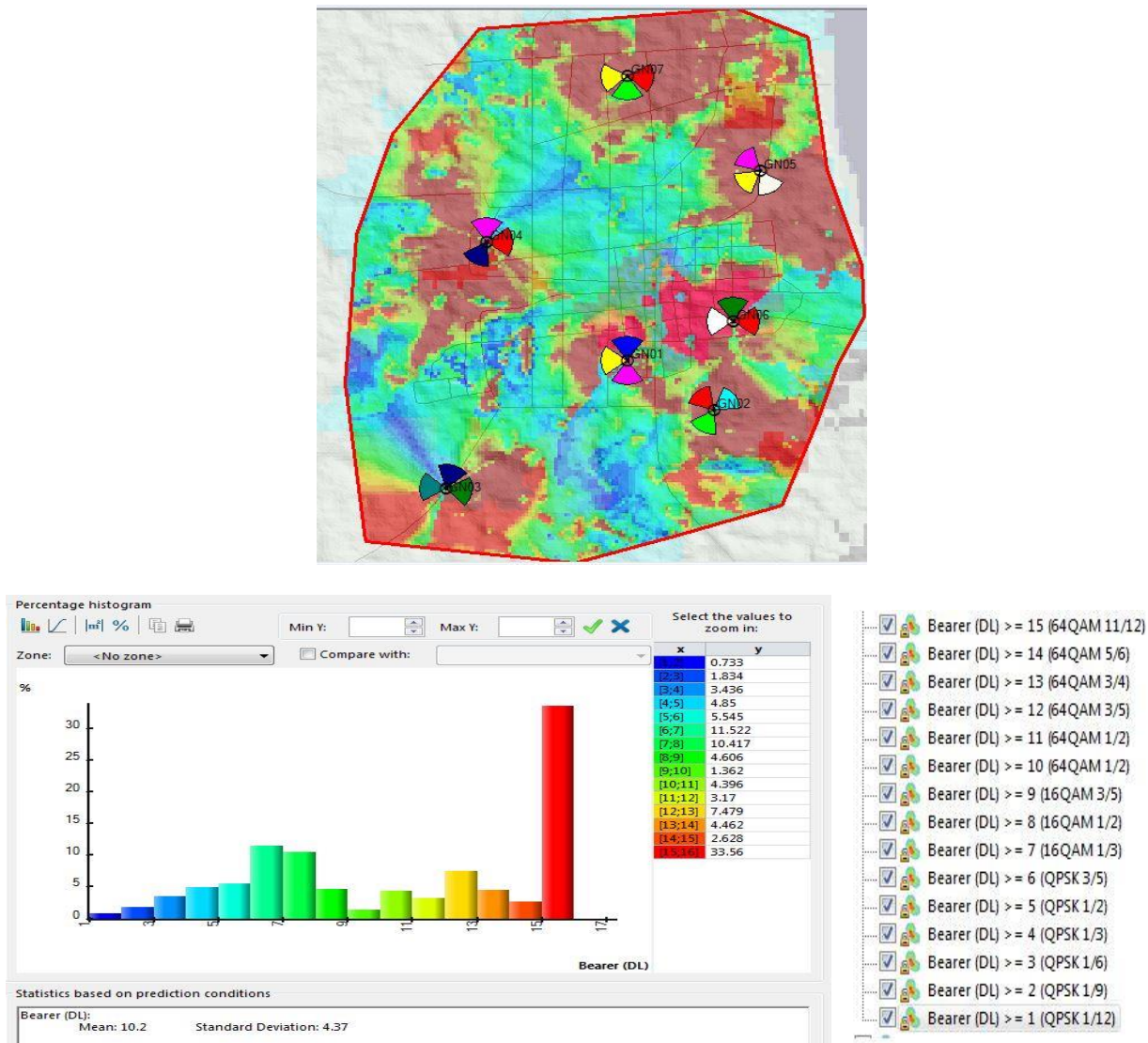


Figura 49. Análisis de área de servicio en el DL.

6.2.6. Predicciones de cobertura por nivel de throughput

En la figura 52 podemos observar en la figura de la izquierda, el throughput dado por la portadora principal, este caso sería una sola portadora igual que LTE- Release 8, en esta figura podemos observar que las zonas más cercanas, son modulaciones 64 QAM, esto es alrededor de un 57% del mapa según el histograma, vamos a tener un throughput efectivo de entre 110 y 130 Mbps, tenemos las zonas intermedias que son los una modulación de 16QAM, según los resultados del histograma es el 26% del área, tendremos un throughput efectivo entre 60 y 100 Mbps. Y tenemos que los 17% restantes son modulaciones QPSK, que tienen un throughput efectivo de entre 1mbps a 50mbps.

En la figura de la derecha tenemos la portadora secundaria todavía sin su agregación, de igual manera tendremos una sola portadora, aquí podemos observar de igual manera que la anterior que el 53% del área es una modulación 64QAM, aquí según el histograma tendremos un throughput efectivo de entre 100 y 130 Mbps, para las zonas intermedias que serían un 20% del área de la zona urbana de granada tendremos una modulación 16QAM, con un throughput efectivo de entre 50 y 100 Mbps y tenemos que las zonas más alejadas al eNodeB representadas por modulación QPSK, tendríamos un 27%, throughput efectivo de entre 1 a 40 Mbps.

En la figura 53 podemos observar la agregación de portadora donde sobreponemos la portadora principal y la secundaria, para obtener como resultado, un mejor rendimiento del throughput efectivo de la red, en la figura podemos observar, los resultados obtenidos podemos que mientras más cerca al eNodeB, tenemos las modulaciones 64QAM, aquí podemos ver que tenemos un 67% de área con un throughput efectivo de entre 180 Mbps a 230 Mbps, tenemos las zonas medias, aquí tendríamos una modulación 16QAM, estas serían un área de 20%, con throughput de entre 100 a 170 Mbps, tenemos el área de borde de celda, que serían modulaciones QPSK, alrededor de un 13%, que sería un throughput 1 a 90 Mbps. Con la agregación de portadora comparada con los resultados anteriores podemos ver que obtuvimos una mejor cobertura por rendimiento y también una mejora rendimiento de casi el doble del throughput de que si solo hubiéramos usado una portadora en la red.

En la figura 54, tenemos el throughput del enlace ascendente, podemos ver la agregación de portadora, portadora principal + secundaria, en el siguiente histograma podemos ver que la mayoría que en un 99% del mapa son modulaciones 16QAM, con un throughput efectivo de entre 110 Mbps a 160 Mbps.

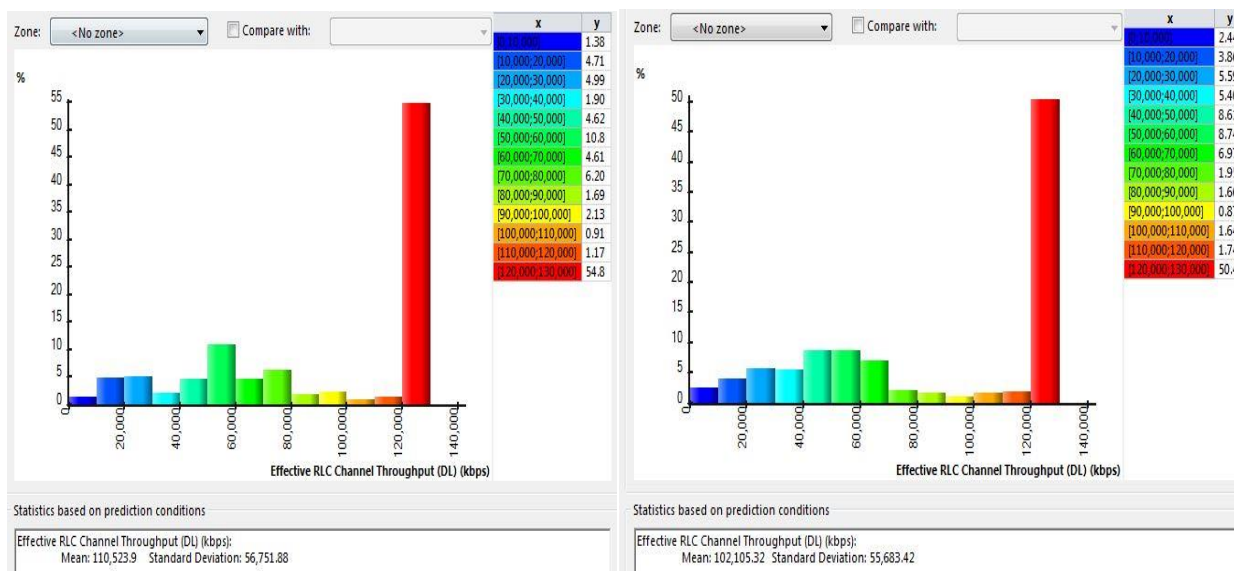
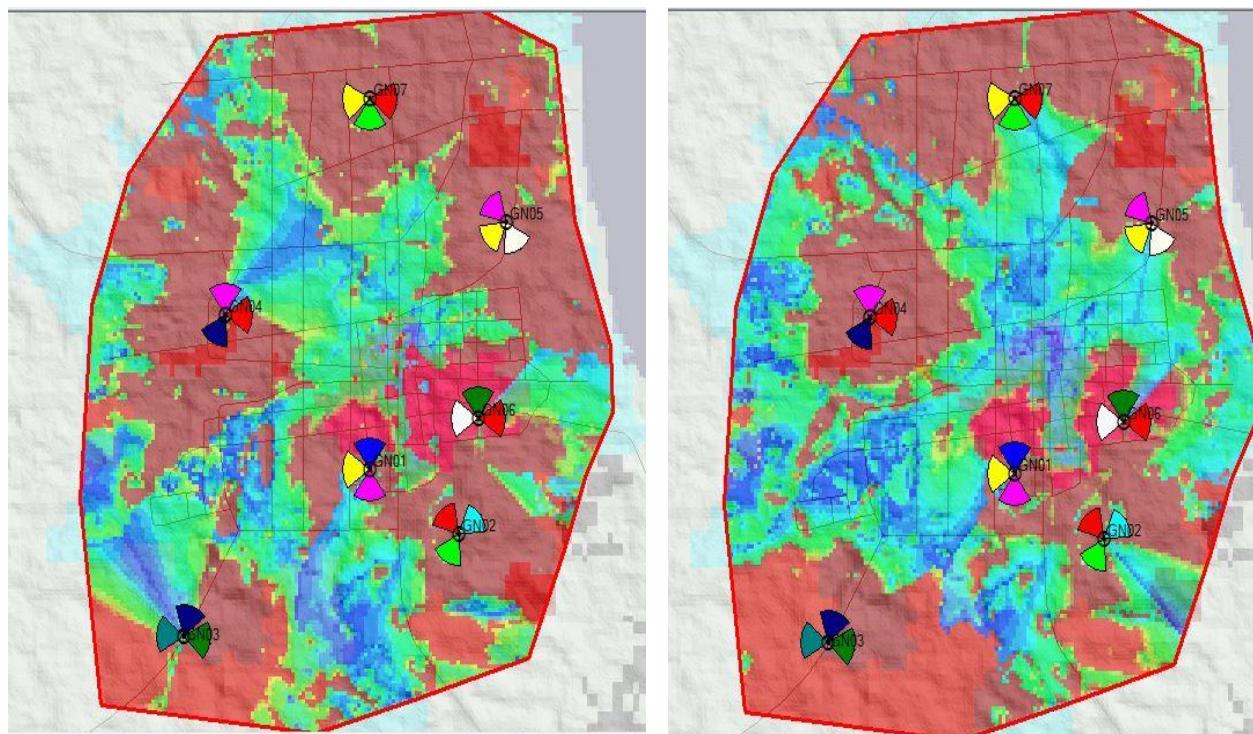


Figura 50. Cobertura por throughput portadora principal y secundaria en DL e Histograma.

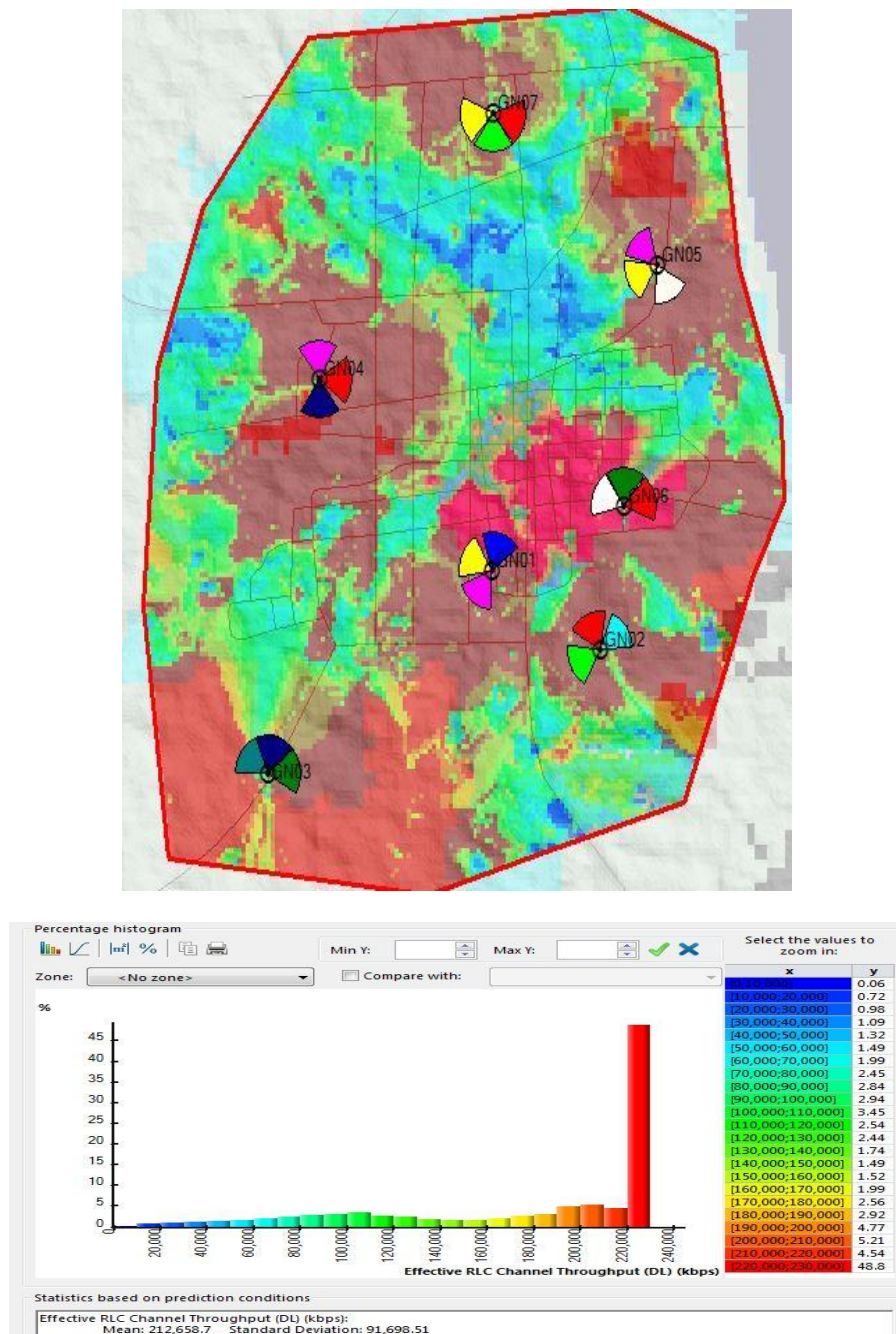


Figura 51. Cobertura por throughput portadora principal + portadora secundaria agregación de portadora en DL e Histograma

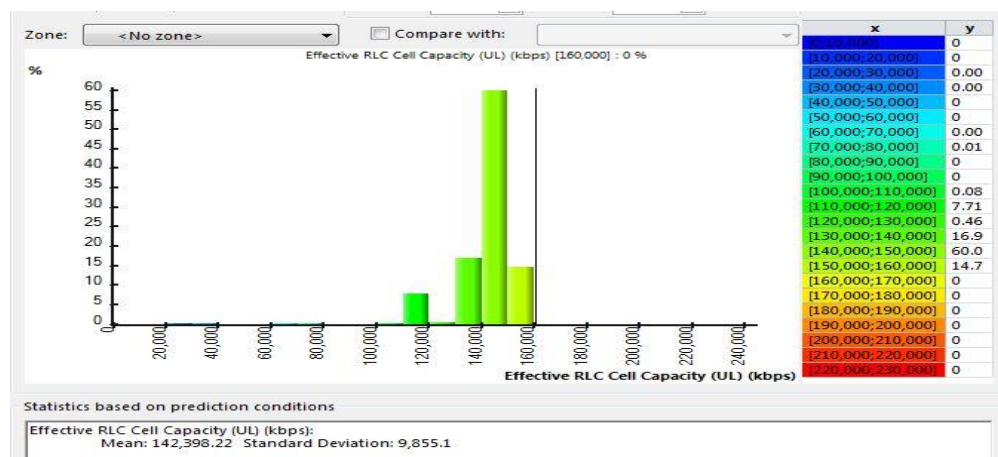
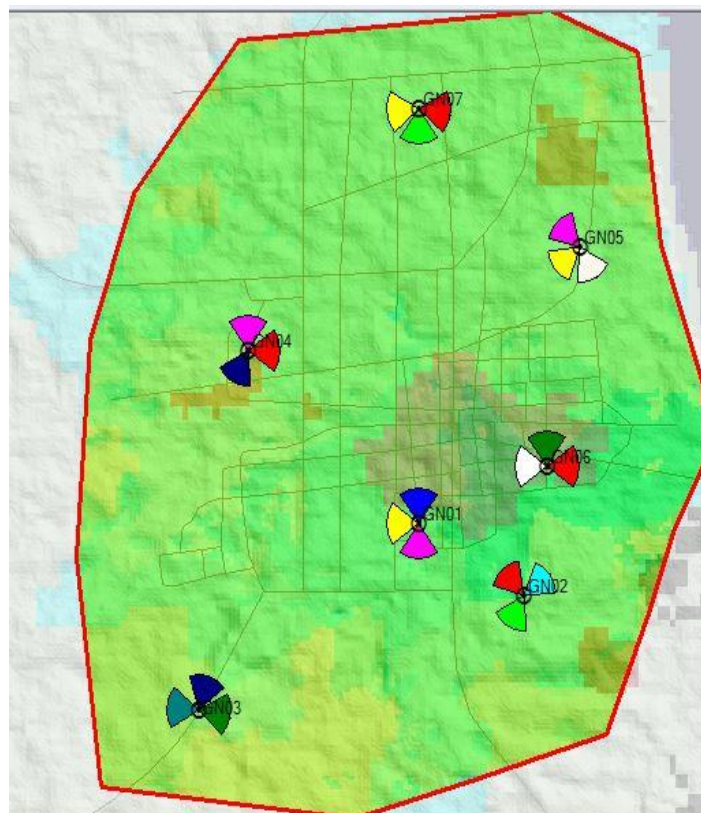


Figura 52. Cobertura por nivel de throughput UL portadora principal +Secundaria agregación de portadora e Histograma

Capítulo VII. Simulaciones Monte Carlo

7.1. Mapas de tráfico

Una vez desplegada y optimizada la red, procederemos a realizar simulaciones que intenten describir de manera realista el comportamiento que tiene la red en un momento dado. Para la realización de las simulaciones de tráfico, puesto que no se disponía de datos del operador sobre la carga por sector de la red o las densidades de población de la zona de estudio, se optó por generar un User Profile Traffic Maps ya que sí se conoce el entorno en el que se está desplegando la red, configurado como se detalla en la figura 55.

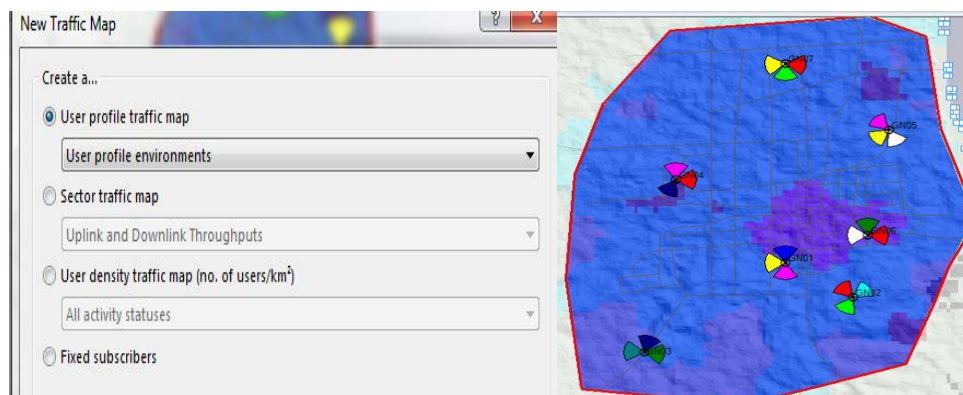


Figura 53. Configuración de simulación Monte Carlo

El rendimiento del sistema en función de la cantidad de usuarios, se ha añadido un mapa de tráfico, que intenta simular un modelo realista de uso de terminales móviles en la ciudad de Granada. Este mapa de tráfico se basa en las densidades de usuarios de cada entorno (Ver detalles Figura 56) en este caso entorno urbano que fueron modificados de los objetivos de la simulación.

Urban Properties

General		Clutter Weighting
Name:	Urban	
User profiles:		
User Profile	Mobility	Density (Subscribers/km ²)
Postpago	Pedestrian	48
Postpago	Estacionarios	97
Postpago	50 km/h	17
Prepago	50 km/h	65
Prepago	Estacionarios	388
Prepago	Pedestrian	195
*		

Figura 54. Densidad del entorno urbano

El Global Scaling Factor es un parámetro que nos permite controlar la densidad de usuarios en la red, operando como factor multiplicativo cada vez que se realiza una simulación. Como en este proyecto se va a analizar el comportamiento de la red desplegada según la carga de tráfico, se han realizado las simulaciones correspondientes según el caso en cuestión, se ha variado el Global Scaling Factor en 1, 3 y 5. Hay que tener presente que para cada grupo de simulaciones se han realizado diez simulaciones y los datos presentados son la media del grupo completo de simulaciones. A continuación presentaremos los diferentes Scaling Factor obtenidos de las simulaciones Monte Carlo en AtoI™, sus resultados se muestran en las Figuras 57, 58, 59.

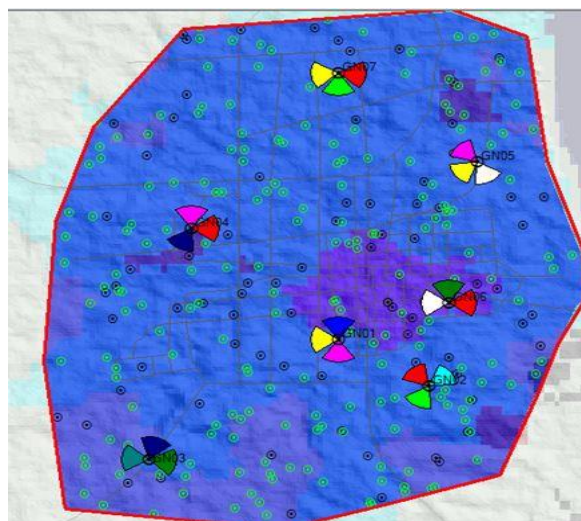


Figura 55. Simulación Monte Carlo Scaling Factor 1

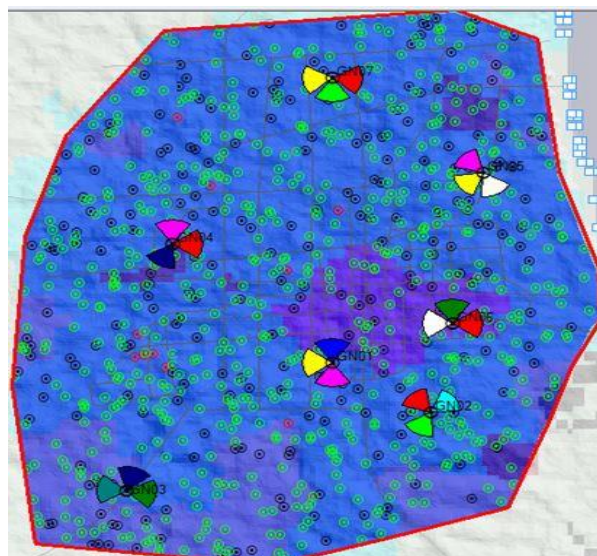


Figura 56. Simulación Monte Carlo Scaling Factor 3.

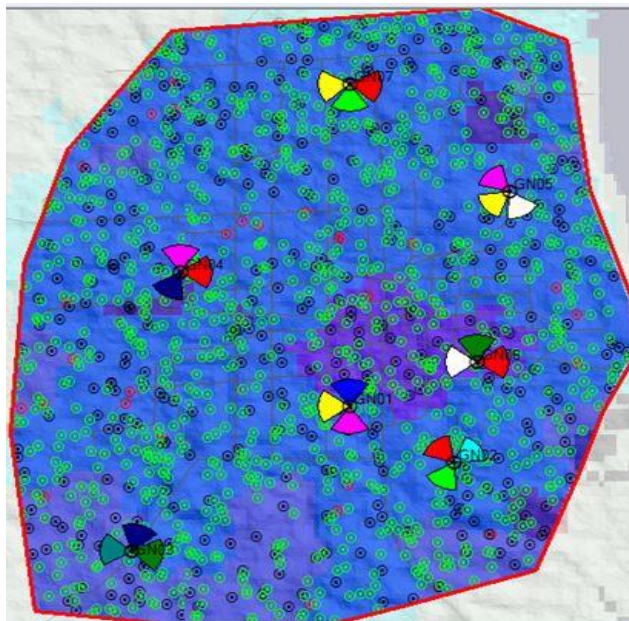


Figura 57. Simulación Monte Carlo Scaling Factor 5

Presentaremos una tabla con las estadísticas generales de la red, de la demanda de los usuarios y los resultados obtenidos.

Tabla 21. Estadísticas de simulaciones realizadas a diferentes Scaling Factor. (Elaboración propia)

	Scaling factor 1		Scaling factor 3		Scaling factor 5	
Traffic Load	12.5%		30%		50%	
	Demand	Result	Demand	Result	Demand	Result
User	253	253	808	804	1442	1416
Active DL	130	130	391	388	678	661
Active UL	46	46	129	128	259	254
Active DL+UL	23	23	59	59	114	113
Inactive	54	54	229	229	391	388
No coverage	0	0	0	0	0	0
No service	0	0	4 (0.4%)	4 (0.4%)	26 (1.8%)	26 (1.8%)
Scheduler saturat	0	0	0	0	0	0
Resource saturat	0	0	0	0	0	0

En esta Tabla 21 se puede observar que la demanda de tráfico en el DL es mayor que en el UL, la razón es que en la actualidad los usuarios tienden a navegar más y a descargar más información por Internet y esto implica más tráfico en el downlink que en el uplink. Por eso se ha tomado la decisión de escoger el parámetro de relevancia el Traffic Load (DL) para variarlo en Atoll™. Variando este parámetro se ha conseguido

simular una red según la carga de tráfico en un caso real, desde una red sin mucha carga hasta una red con alta carga de tráfico en el que poder evaluar el estado de la red en casos de alta densidad de usuarios.

Observando la misma Tabla 21 nos podemos dar cuenta que para los diferentes, para el Scaling factor 1 no se observa ningún problema todos los usuarios están conectados, en el Scaling factor 3, se encontraron que hay usuarios un porcentaje 0.4% no alcanza el servicio o es rechazo, porque no tiene servicio en la zona donde se encuentra, este porcentaje es muy bajo así que los usuarios que quieran conectarse a la red lo harán sin ningún problema, pero la cantidad de usuarios que no alcanzar servicio aumentara, como lo vemos en el Scaling Factor 5 donde este rechazo de usuarios aumenta un 1.8%, esto no quiere decir que más usuarios no se puedan conectar pero lo que se lograría es saturar la red y rechazar o perder más usuarios.

A continuación presentamos en la Tabla 22 el desglose de todos los servicios, viendo con más detalle el comportamiento de la red para un tráfico dado, tomando los datos obtenidos de los diferentes Scaling Factor, para cada grupo de simulaciones, sus resultados según los servicios demandados.

Tabla 22. Descripción de servicio por diferentes simulaciones Monte Carlo parte 1. (Elaboración propia)

Servicio		Scaling factor 1		Scaling factor 3		Scaling factor 5	
	Traffic Load	12.5%		30%		50%	
		Demand	Result	Demand	Result	Demand	Result
VoIP	User	136	136	415	413	749	738
	Active DL	38	38	105	103	177	172
	Active UL	37	37	83	83	174	172
	Active DL+UL	22	22	59	59	112	111
	Inactive	39	39	168	168	286	283
	Effective RLC Aggregate Throughput (DL)	1.54 Mbps		4.1 Mbps		7.03 Mbps	
	Effective RLC Aggregate Throughput (UL)	1.51 Mbps		3.64 Mbps		7.25 Mbps	
Video Conference	User	18	18	74	74	132	131
	Active DL	2	2	6	6	15	14
	Active UL	0	0	7	7	10	10
	Active DL+UL	0	0	0	0	2	2
	Inactive	15	15	61	61	105	105
	Effective RLC Aggregate Throughput (DL)	900 Kbps		1.78 Mbps		4.55 Mbps	
	Effective RLC Aggregate Throughput (UL)	300 Kbps		2.11 Mbps		3.6 Mbps	
Web Browsing	User	17	17	62	60	103	99
	Active DL	11	11	37	36	60	58
	Active UL	6	6	25	24	43	41
	Active DL+UL	0	0	0	0	0	0
	Inactive	0	0	0	0	0	0
	Effective RLC Aggregate Throughput (DL)	107.66 Mbps		529.93 Mbps		738.86 Mbps	
	Effective RLC Aggregate Throughput (UL)	9 Mbps		50.94 Mbps		88.56Mbps	

Tabla 23. Descripción de servicio por diferentes simulaciones Monte Carlo parte 2. (Elaboración propia)

Servicio		Scaling factor 1		Scaling factor 3		Scaling factor 5	
	Traffic Load	12.5%		30%		50%	
		Demand	Result	Demand	Result	Demand	Result
EMAIL	User	0	0	3	3	3	3
	Active DL	0	0	3	3	2	2
	Active UL	0	0	0	0	1	1
	Active DL+UL	0	0	0	0	0	0
	Inactive	0	0	0	0	0	0
	Effective RLC Aggregate Throughput (DL)	0 kbps		3.45 Mbps		2.37 Mbps	
	Effective RLC Aggregate Throughput (UL)	0 kbps		0 Kbps		644.02 kbps	
FTP	User	11	11	47	47	84	82
	Active DL	9	9	33	33	59	58
	Active UL	2	2	14	14	25	24
	Active DL+UL	0	0	0	0	0	0
	Inactive	0	0	0	0	0	0
	Effective RLC Aggregate Throughput (DL)	266.12 Mbps		1308.43 Mbps		1,548.66 Mbps	
	Effective RLC Aggregate Throughput (UL)	30 Mbps		300.5 Mbps		516.04 Mbps	
Streaming media	User	71	71	207	207	374	363
	Active DL	70	70	227	225.2	365	357
	Active UL	1	1	0	0	6	6
	Active DL+UL	0	0	0	0	0	0
	Inactive	0	0	0	0	0	0
	Effective RLC Aggregate Throughput (DL)	17.11Mbps		51.77 Mbps		86.41 Mbps	
	Effective RLC Aggregate Throughput (UL)	31.26Kbps		0 kbps		187.63 kbps	

Lo primero que se logra visualizar en estas tablas y se debería resaltar es que los servicios de VoIP y streaming media, son los más demandados por los usuarios, esto sucede por la manera en que está definido el tráfico de los servicios y los diferentes tipos de usuarios de manera que estos dos servicios predominen por encima de los otros.

Otra cosa que es importante señalar que no existe la misma linealidad en la distribución de los usuarios en los servicios ofertados, si se puede decir que la cantidad de usuarios siguen una escala lineal, a la hora de ver el estudio a diferentes Scaling Factor. Esto no quiere decir que los usuarios en la red, consumirán los servicios ofertados en una escala lineal, esto depende de otro factor como es el Scheduler seleccionado para el proyecto que para este caso es Proportional fair, que es una estrategia basada en el mantenimiento de un equilibrio entre dos intereses: maximizar el desempeño de la red y permitir a todos los UE al menos un nivel mínimo de servicio. Esta estrategia tiene en cuenta el estado del canal para asignar recursos, priorizando usuarios que tenga mejores condiciones, pero cumpliendo el criterio de justicia proporcional.

Capítulo VIII. Conclusiones y líneas futuras de trabajos

8.1. Conclusiones

Como conclusión tenemos que implementando una metodología de Radio Network Planning para el dimensionamiento de la red LTE-Avanzada se pudo realizar o hacer una estimación de un plan nominal para la zona urbana de la Ciudad de Granada, Nicaragua.

Como resultado de nuestro análisis comparativo concluimos que entre LTE reléase 8 y LTE-Advanced reléase 10, se puede observar que LTE-Advanced no es una tecnología nueva, es la misma tecnología, simplemente añade nuevas características como MIMO 8x8, carrier aggregation, relay nodes, estas características que introduce mejoras sus prestaciones lo que le permite alcanzar los valores establecidos por el IMT-Advanced.

Mediante el dimensionamiento cobertura y capacidad, tenemos como conclusión, que el objetivo principal del dimensionamiento es minimizar los costos del diseño de la red, también obtuvimos una estimación de diseño, estos resultados nos ayudaron a conseguir la pérdida máxima permisible tanto como para el enlace de bajada como el de subida, así también el número de eNodeB necesarios para implementar en la ciudad de Granada 7 sitios, así como el número necesario para cubrir con la capacidad 4 sitios de la red para 8009 usuarios.

Los resultados obtenidos mediante las optimización de la herramienta de Radio Network Planning que en este caso es el software Atoll™, con la ayuda de mapas de sitios, co-ubicación, planificación de frecuencias, asignación de vecinos, planificación del Physical Cell ID, calibración de modelos de propagación, podremos ver resultados más adaptados a la situación actual de la zona urbana de la ciudad de Granada, Nicaragua donde se realizó el estudio.

Mediante las predicciones de cobertura tanto las que dependen y no dependen del tráfico podemos observar que existen niveles aceptables para la implementación de la red LTE-A, tenemos una relación de señal, interferencia + ruido, $C/(i+N)$, en el tenemos un 46% con niveles excelentes y buenos, del área de la zona de urbana de Granada, Nicaragua, de entre 13dB y mayores a 20 dB, y con la implementación de la agregación de portadora, podemos ver una mejora en el rendimiento de la red de hasta el doble throughput de una sola portadora.

Los resultados obtenidos mediante las predicciones Monte Carlo son buenos, variando los diferentes Scaling factor, pudimos observar, que la red con diferentes cargas, no existe un rechazo significativo que afecte el funcionamiento de la red, podemos ver que en altas cargas de usuarios hay un mínimo rechazo que es aceptable, ya que es menor a 1.8% y es debido a que el área en el que se encuentran no existe servicio.

8.2. Recomendaciones y líneas futuras de trabajos monográficos

A partir de nuestro proceso investigativo, existen temas que no forman parte de nuestros objetivos, por esta razón proponemos como recomendaciones a trabajos futuros:

- Planificación de una red LTE-A, con la herramienta AtollTM, analizando el impacto de diferentes técnicas de Packet Scheduling.
- Planificación de una red LTE-A con herramienta AtollTM, analizando el impacto de diferentes técnicas de antena SU-MIMO, MU-MIMO, diversidad de transmisión, beamforming.
- Realización de un estudio técnico para la migración de la tecnología LTE a LTE-A.
- Desarrollar manuales o guías de laboratorio para el software AtollTM, para la tecnología LTE-A para mejorar la enseñanza- aprendizaje, en la carrera de Telecomunicaciones.
- Elaboración de planes de mercadeo para adquisición de usuarios y tarifas de servicio para LTE-Advanced.
- Planificación e implementación de una red LTE-A, Heterogénea con la herramienta AtollTM.
- Extender nuestro estudio a otras partes del país, como la ciudad de Managua.
- Análisis de interferencias de una red LTE-A, en una red heterogénea.
- Planificación y dimensionamiento de una red LTE-A en modo de acceso TDD, en el software AtollTM.

Bibliografía

- [1] Forks, «ATOLL WIRELESS NETWORK ENGINEERING SOFTWARE. Administrador manual.Version 3.2.2,» Francia, 2016.
- [2] U. I. d. Valencia, «www.universidadviu.com,» [En línea]. Available: <https://www.universidadviu.com/evolucion-la-red-comunicacion-movil-del-1g-al-5g/>.
- [3] J. J. O. M. G. J. F. M. Narcis Cardona, «3GPP LTE: Hacia la 4G móvil,» de *3GPP LTE: Hacia la 4G móvil*, Barcelona, Marcombo, 2011.
- [4] i. T. M. B. Stefania Sesia, *LTE-THE UMTS Long Term Evolution.From the theory to practice*, USA: Wiley Second edition, 2011, pp. 27-29.
- [5] 3GPP, «LTE;Requirements for further advancements for Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA),» 3GPP TR 36.913 version 10.0.0 Release 10, EUROPA, 2011.
- [6] f. 3. Jeanette Wannstrom, «3rd Generation Partnership Project,» junio 2013. [En línea]. Available: <http://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/97-lte-advanced>.
- [7] C. M. H. B. Víctor Manuel Quintero Flórez, «Multiplexación y acceso por división de frecuencias ortogonales Sistemas OFDM,» Comunicaciones Inalambricas, 2011.
- [8] M. K. S. M. Andreas Roessler, «Carrier aggregation- (one) Key enabler for LTE-Advanced,» Rohde and Schwarz, Germany, 2012.
- [9] S. N. T. y. k. x. S. k. k. Hidekazu taoka, «MIMO and CoMP in LTE-Advanced,» *DOCOMO BEIJING communications*, vol. 12, nº 2, pp. 21-25.
- [10] C. Cox, *An introduction to LTE, LTE,LTE-Advanced, SAE and 4G Mobile Commnications*, United kingdom: Wiley, 20, pp. 284-286.
- [11] G. L. Pradas, «PREDISTORSIÓN DIGITAL DE UN SISTEMA DE COMUNICACIONES OFDM: ESTUDIO MEDIANTE SIMULACIÓN,» Sevilla, 2011.
- [12] A. R. J. S. M. Kottkamp, «white paper- LTE-Advanced Technology Introduction,» Rohde and Schwarz, Germany, 2012.
- [13] L. korowajczuk, *LTE, WIMAX and WLAN Network Design, Optimization and Performance Analysis*, United kingdom: Wiley, 2011.
- [14] D. d. i. d. R. a. S. España, «LTE (Long Term Evolution) El siguiente nivel,» Rohde and Schwarz, España, 2010.
- [15] C. &. E. E. Electrical, «University of Colorado Boulder,» [En línea]. Available: http://ecee.colorado.edu/~liue/teaching/comm_standards/2015S_IEEE_802.11n/Webpages/constellation.html.
- [16] A. H. Bhavesh Khasdev, «Overview of MIMO Technology in LTE, LTE-A & LTE-A-Pro,» *International Journal Of Engineering And Computer Science*, vol. 5, nº 10.18535, pp. 19227-19229, 2016.
- [17] Z. D. N. A. a. E. Y. Mona Jaber, «Tutorial on LTE/LTE-A Cellular Network Dimensioning Using Iterative Statistical Analysis,» de *IEEE COMMUNICATIONS SURVEYS & TUTORIALS*, Qatar, 2016.

- [18] H. & A. Toskala, LTE for UMTS: OFDMA and SC-FDMA based radio access, John Wiley & Sons, 2009.
- [19] A. I. D. Agbotiname L. Imoize, «Path Loss Characterization of Long Term Evolution Network for Lagos, Nigeria,» *Jordan Journal of Electrical Engineering*, vol. 4, nº 2, pp. 114-128, 2018.
- [20] L. Encyclopedia, «LTE Encyclopedia,» [En línea]. Available: <https://sites.google.com/site/lteencyclopedia/lte-radio-link-budgeting-and-rf-planning>.
- [21] C. J. C. CUENCA, «DIMENSIONAMIENTO DE UN CLÚSTER DE RED LTE PARA BRINDAR COBERTURA EN LA ZONA COMERCIAL DE LA CIUDAD DE LOJA,» QUITO, 2017.
- [22] I. N. d. Desarrollo, «Anuario estadístico,» INIDE, 2016.
- [23] INTUR, «Boletín estadístico de turismo,» Instituto Nacional de turismo, 2017.
- [24] CISAS, «CISAS,» 2015. [En línea]. Available: <http://www.cisas.org.ni/node/103>.
- [25] N. Larocca, «telesemana,» [En línea]. Available: <https://www.telesemana.com/blog/2018/01/29/nicaragua-usuarios-moviles-4g-crecieron-62-anual-hasta-70-000/>.
- [26] Huawei, «LTE Radio Network Capacity Dimensioning,» Huawei Technologies Co., LTD, 2013.
- [27] I. R. Setyaji Zunaierlan, «4G LTE Network Design Around Budi Luhur University Campus And Its Neighborhood Area,» de *First International Conference on Micro and Nano Technologies, Modelling and Simulation*, Indonesia, 2016.
- [28] M. A. .. H. K. K. I. Nafiz Imtiaz Bin Hamid, «Nominal and Detailed LTE Radio Network Planning considering Future Deployment in Dhaka City,» *International Journal of Computer Applications*, pp. 37-44, 17 Julio 2012.
- [29] Telcor, «<http://legislacion.asamblea.gob.ni>,» 05 Febrero 2015. [En línea]. Available: [http://legislacion.asamblea.gob.ni/Normaweb.nsf/\(\\$All\)/8755971A83590311062582E20077E478?OpenDocument](http://legislacion.asamblea.gob.ni/Normaweb.nsf/($All)/8755971A83590311062582E20077E478?OpenDocument).
- [30] C. E. R. Aviles, «Estudio experimental por simulación del diseño de una red LTE de telefonía y datos móviles en Nicaragua,» Facultad de electrónica y computación, Managua, 2013.
- [31] Y. C. W. L. C. Y. Guangyuan LI, «A method for calibrating standard propagation model in LTE System,» de *IEEE international conference on communication technology*, Beijing, China., 2017.
- [32] «Keysight Technologies LTE-Advanced Technology and Test Challenges 3GPP release 10, 11, 12,» Keysight Technologies, USA, 2017.

Anexos

Anexo A: Algoritmo de diseño de una red LTE Atoll™.

Anexo B: Algoritmo empleado por Atoll™ para la simulación de Monte Carlo.

Anexo C: Acuerdo administrativo de la banda AWS CLARO.

Anexo D: Drive Test ciudad de Granada.

Anexo E: Speed Test ciudad de Granada.

Anexo F: Configuración de emplazamientos Atoll™.

Anexo G: Configuración de transmisores Atoll™.

Anexo H: Configuraciones de transmisores Atoll™, parte #2.

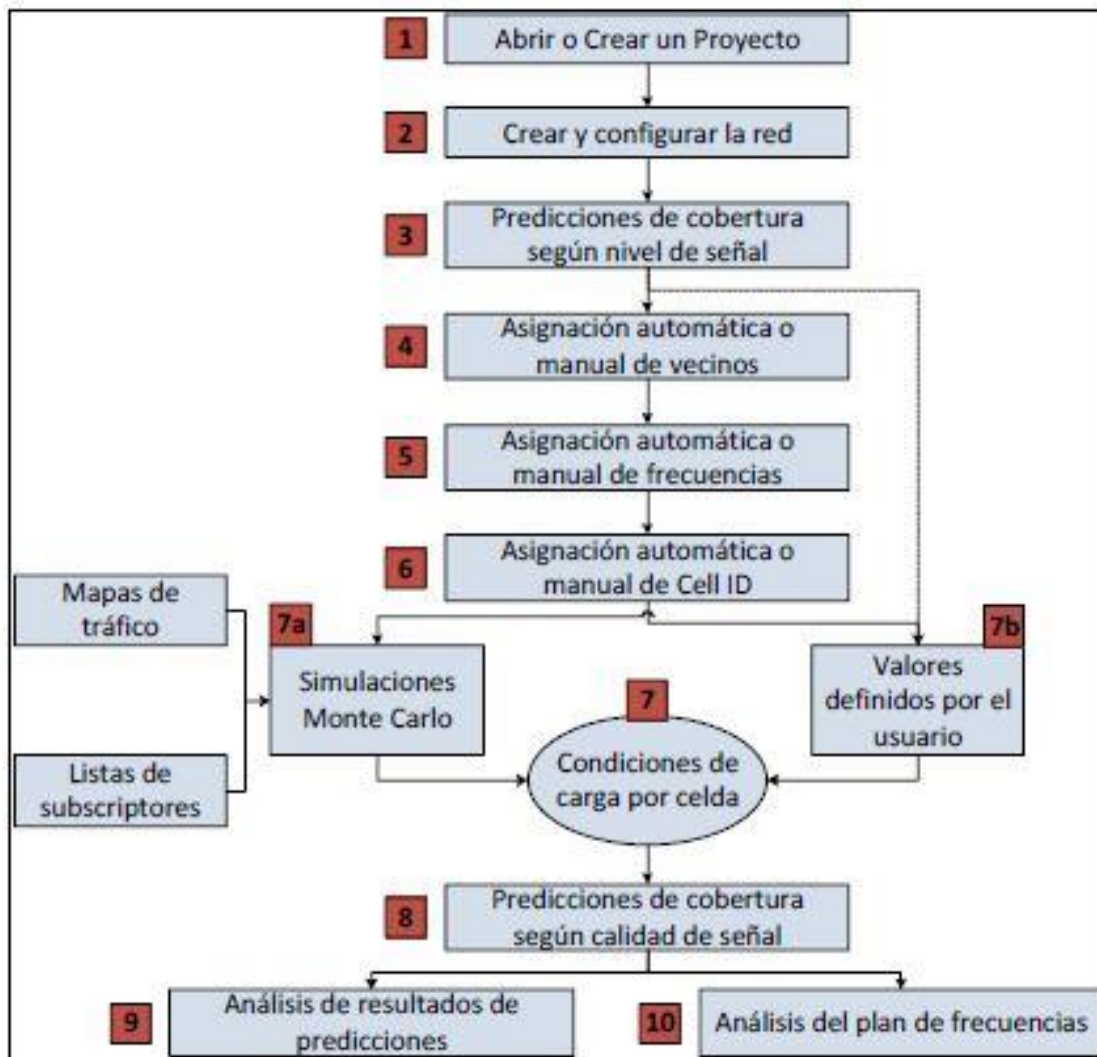
Anexo I: Configuración de las celdas Atoll™

Anexo J: Configuración de celdas Atoll™, parte #2.

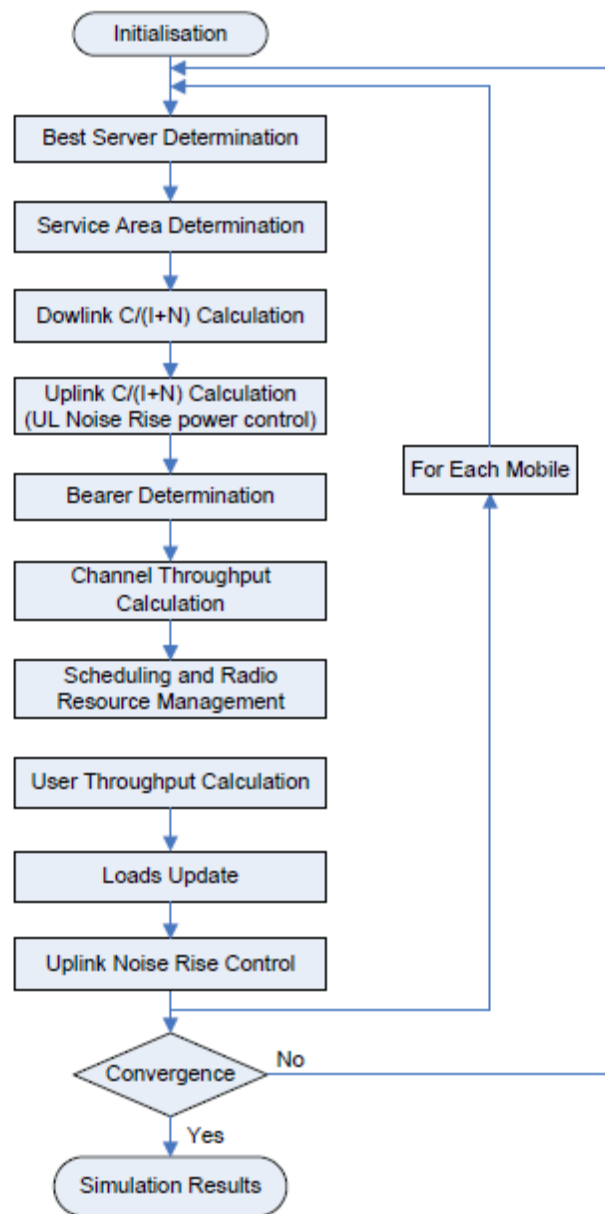
Anexos K: Configuración de celdas Atoll™, parte #3.

Anexos L: Configuración de celdas Atoll™, parte #4.

Anexo A: Algoritmo de una red LTE en Atoll™



ANEXO B: Algoritmo Monte Carlo Atoll™





ANEXO C: Acuerdo administrativo Claro

C (A): Acuerdo administrativo banda 4

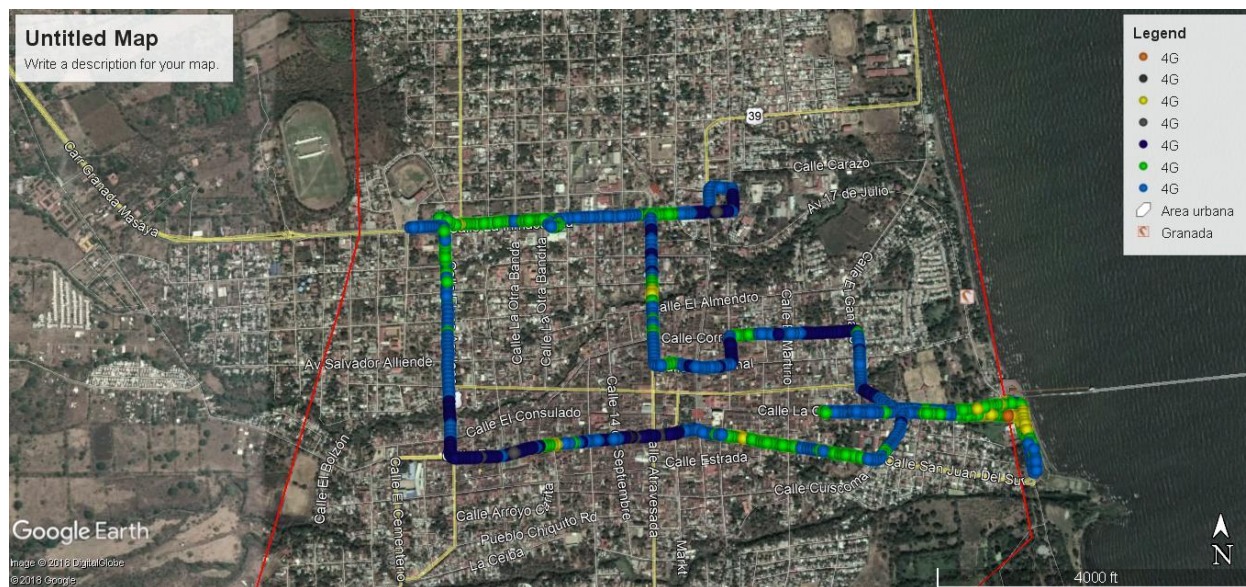
ACUERDO ADMINISTRATIVO 003-2015
CUADRO DE DERECHOS Y TASAS DE LOS SERVICIOS DE TELECOMUNICACIONES
Managua, 5 de Febrero del año 2015.







CONCEPTO	TASA ANUAL por cada 12 MHz	CONCEPTO	TASA ANUAL por cada 20 MHz
E. 23 POR USO DE LA BANDA DE 700 MHz PARA TRANSMISIÓN DE DATOS		E. 25 POR USO DE LAS BANDAS DE 1710-1730 MHz y 2110-2130 MHz	
MANAGUA	C\$ 158,377.00	MANAGUA	C\$ 190,250.00
MATAGALPA	C\$ 26,420.00	MATAGALPA	C\$ 23,153.67
CHINANDIGA	C\$ 34,896.00	CHINANDIGA	C\$ 30,572.50
LEON	C\$ 29,333.00	LEON	C\$ 25,706.31
RAAS	C\$ 20,094.00	RAAS	C\$ 17,609.67
MASAYA	C\$ 23,076.00	MASAYA	C\$ 21,011.67
JINOTEGA	C\$ 10,340.00	JINOTEGA	C\$ 9,061.50
RAAN	C\$ 9,795.00	RAAN	C\$ 8,584.31
ESTELI	C\$ 16,066.00	ESTELI	C\$ 14,079.31
NUOVA SEGOVIA	C\$ 11,997.00	NUOVA SEGOVIA	C\$ 10,514.00
GRANADA	C\$ 15,680.00	GRANADA	C\$ 13,740.00
CHONTALÉS	C\$ 13,540.00	CHONTALÉS	C\$ 11,873.17
CARAZO	C\$ 15,522.00	CARAZO	C\$ 11,888.81
BOACO	C\$ 7,913.00	BOACO	C\$ 6,934.67
RIVAS	C\$ 6,602.00	RIVAS	C\$ 5,527.31
MADRIZ	C\$ 4,794.00	MADRIZ	C\$ 4,201.17
RIO SAN JUAN	C\$ 2,910.00	RIO SAN JUAN	C\$ 2,550.33
PARTE BAJA			
Bloque Frec. (MHz)	Ancho de Banda	Bloque	Rango de Frecuencias MHz Ancho de Banda
A	698-704, 728-734 12 MHz	Up Link (UL)	Down Link (DL) Banda Duplexación
B	704-710, 734-740 12 MHz	A	1710-1730 2110-2130 2 x 20 MHz FDD
C	710-716, 740-746 12 MHz	B	1730-1750 2130-2150 2 x 20 MHz FDD
D	716-722 6 MHz	C	1750-1770 2150-2170 2 x 20 MHz FDD
E	722-728 6 MHz		

C (B): Acuerdo administrativo Claro parte baja y alta

PARTE BAJA				PARTE ALTA			
Bloque	Frec. (MHz)	Ancho de Banda		Bloque	Frec. (MHz)	Ancho de Banda	
A	698-704, 728-734	12 MHz		A	746-752, 776-782	12 MHz	
B	704-710, 734-740	12 MHz		B	752-758, 782-788	12 MHz	
C	710-716, 740-746	12 MHz		C	758-764, 788-794	12 MHz	
D	716-722	6 MHz					
E	722-728	6 MHz					
PARTE ALTA				PARTE BAJA			
Bloque	Frec. (MHz)	Ancho de Banda		Bloque	Frec. (MHz)	Ancho de Banda	
A	746-752, 776-782	12 MHz		A	698-704, 728-734	12 MHz	
B	752-758, 782-788	12 MHz		B	704-710, 734-740	12 MHz	
C	758-764, 788-794	12 MHz		C	710-716, 740-746	12 MHz	
				D	716-722	6 MHz	
				E	722-728	6 MHz	
<p>Para los bloques A, B y C (12 MHz c/u) aplican las tasas establecidas en la Tabla, y para cada uno de los Bloques D y E (6 MHz c/u), aplica la mitad del valor de las tasas establecidas.</p>				<p>E. 24 POR USO DE LAS BANDAS DE 3.4 GHz.</p> <p>Por cada MHz se deberá pagar las Tasas establecidas para el numeral E. 20</p>			
				<p>E. 26 Por la asignación de cada Recurso de Numeración de Telefonía Celular.</p>			
				<p>* Las Tasas y Derechos reflejados en dólares podrán ser cancelados en Córdobas al tipo de cambio oficial que emita el Banco Central de Nicaragua.</p>			
				<p>*US\$ 0.18</p>			

Anexo D: Drive test Ciudad de Granada



- Nivel señal -60 
- Nivel señal -70 
- Nivel señal -80 
- Nivel señal -90 
- Nivel señal -100 
- Nivel señal -110 



ANEXO E: Speed Test





ANEXO F: Emplazamientos Atoll™

Name	Longitude	Latitude	Altitude (m)	Support Height (m)	Max S1 interface throughput (DL) (kbps)	Max S1 interface throughput (UL) (kbps)
GN01	85°57'23.9"W	11°55'35"N	[48]	50	950000	950000
GN02	85°57'6.66"W	11°55'24.44"N	[58]	50	950000	950000
GN03	85°57'59.8"W	11°55'8.1"N	[83]	50	950000	950000
GN04	85°57'51.5"W	11°56'0.4"N	[68]	50	950000	950000
GN05	85°56'57.38"W	11°56'15.35"N	[46]	50	950000	950000
GN06	85°57'2.9"W	11°55'43.4"N	[42]	50	950000	950000
GN07	85°57'23.6"W	11°56'35.6"N	[57]	50	950000	950000



ANEXO G: Configuraciones de transmisores Atoll™

Transmitter	Antenna	Height (m)	Azimuth (°)	Mechanical Downtilt (°)	Main Calculation Radius (m)	Main Propagation Model	Transmission losses (dB)	Reception losses (dB)	Noise Figure (dB)	Hexagon radius (m)
GN01_1	Granada Tilt 4	30	268	0	2000	Standard Propagation Model	1	-2.16	4	1600
GN01_2	Granada Tilt 4	30	2	0	2000	Standard Propagation Model	1	-2.16	4	1600
GN01_3	Granada Tilt 4	30	177	0	2000	Standard Propagation Model	1	-2.16	4	1600
GN02_1	Granada Tilt 4	30	318	0	2000	Standard Propagation Model	1	-2.16	4	1600
GN02_2	Granada Tilt 4	30	223	0	2000	Standard Propagation Model	1	-2.16	4	1600
GN02_3	Granada Tilt 4	30	52	0	2000	Standard Propagation Model	1	-2.16	4	1600
GN03_1	Granada Tilt 4	30	111	0	2000	Standard Propagation Model	1	-2.12	4	1600
GN03_2	Granada Tilt 4	30	25	0	2000	Standard Propagation Model	1	-2.16	4	1600
GN03_3	Granada Tilt 4	30	297	0	2000	Standard Propagation Model	1	-2.16	4	1600
GN04_1	Granada Tilt 4	30	2	0	2000	Standard Propagation Model	1	-2.16	4	1600
GN04_2	Granada Tilt 4	30	93	0	2000	Standard Propagation Model	1	-2.16	4	1600
GN04_3	Granada Tilt 4	30	182	0	2000	Standard Propagation Model	1	-2.16	4	1600
GN05_1	Granada Tilt 4	30	231	0	2000	Standard Propagation Model	1	-2.16	4	1600
GN05_2	Granada Tilt 4	30	152	0	2000	Standard Propagation Model	1	-2.16	4	1600
GN05_3	Granada Tilt 4	30	315	0	2000	Standard Propagation Model	1	-2.16	4	1600
GN06_1	Granada Tilt 4	30	358	0	2000	Standard Propagation Model	1	-2.16	4	1600
GN06_2	Granada Tilt 4	30	88	0	2000	Standard Propagation Model	1	-2.16	4	1600
GN06_3	Granada Tilt 4	30	272	0	2000	Standard Propagation Model	1	-2.16	4	1600
GN07_1	Granada Tilt 4	30	180	0	2000	Standard Propagation Model	1	-2.16	4	1600
GN07_2	Granada Tilt 4	30	98	0	2000	Standard Propagation Model	1	-2.16	4	1600
GN07_3	Granada Tilt 4	30	262	0	2000	Standard Propagation Model	1	-2.16	4	1600



ANEXO H: Configuraciones de transmisores Atoll™, parte #2

TMA Equipment	Feeder Equipment	Transmitter Equipment	Main Resolution (m)	Extended resolution (m)	Number of Transmission Antenna Ports	Transmitter Type
Equipment Granada	Granada 1/2" at 2100 MHz	Granada -eNode-B Equipment	20	50	8	Intra-network (Server and Interferer)
Equipment Granada	Granada 1/2" at 2100 MHz	Granada -eNode-B Equipment	20	50	8	Intra-network (Server and Interferer)
Equipment Granada	Granada 1/2" at 2100 MHz	Granada -eNode-B Equipment	20	50	8	Intra-network (Server and Interferer)
Equipment Granada	Granada 1/2" at 2100 MHz	Granada -eNode-B Equipment	20	50	8	Intra-network (Server and Interferer)
Equipment Granada	Granada 1/2" at 2100 MHz	Granada -eNode-B Equipment	20	50	8	Intra-network (Server and Interferer)
Equipment Granada	Granada 1/2" at 2100 MHz	Granada -eNode-B Equipment	20	50	8	Intra-network (Server and Interferer)
Equipment Granada	Granada 1/2" at 2100 MHz	Granada -eNode-B Equipment	20	50	8	Intra-network (Server and Interferer)
Equipment Granada	Granada 1/2" at 2100 MHz	Granada -eNode-B Equipment	20	50	8	Intra-network (Server and Interferer)
Equipment Granada	Granada 1/2" at 2100 MHz	Granada -eNode-B Equipment	20	50	8	Intra-network (Server and Interferer)
Equipment Granada	Granada 1/2" at 2100 MHz	Granada -eNode-B Equipment	20	50	8	Intra-network (Server and Interferer)
Equipment Granada	Granada 1/2" at 2100 MHz	Granada -eNode-B Equipment	20	50	8	Intra-network (Server and Interferer)
Equipment Granada	Granada 1/2" at 2100 MHz	Granada -eNode-B Equipment	20	50	8	Intra-network (Server and Interferer)
Equipment Granada	Granada 1/2" at 2100 MHz	Granada -eNode-B Equipment	20	50	8	Intra-network (Server and Interferer)
Equipment Granada	Granada 1/2" at 2100 MHz	Granada -eNode-B Equipment	20	50	8	Intra-network (Server and Interferer)
Equipment Granada	Granada 1/2" at 2100 MHz	Granada -eNode-B Equipment	20	50	8	Intra-network (Server and Interferer)
Equipment Granada	Granada 1/2" at 2100 MHz	Granada -eNode-B Equipment	20	50	8	Intra-network (Server and Interferer)
Equipment Granada	Granada 1/2" at 2100 MHz	Granada -eNode-B Equipment	20	50	8	Intra-network (Server and Interferer)
Equipment Granada	Granada 1/2" at 2100 MHz	Granada -eNode-B Equipment	20	50	8	Intra-network (Server and Interferer)
Equipment Granada	Granada 1/2" at 2100 MHz	Granada -eNode-B Equipment	20	50	8	Intra-network (Server and Interferer)
Equipment Granada	Granada 1/2" at 2100 MHz	Granada -eNode-B Equipment	20	50	8	Intra-network (Server and Interferer)
Equipment Granada	Granada 1/2" at 2100 MHz	Granada -eNode-B Equipment	20	50	8	Intra-network (Server and Interferer)
Equipment Granada	Granada 1/2" at 2100 MHz	Granada -eNode-B Equipment	20	50	8	Intra-network (Server and Interferer)



Anexo I: Configuración de la celdas Atoll™

Transmitter	Max Power (dBm)	Name	Frequency Band	Channel Number	Reception Equipment	Max number of intra-technology neighbours	Scheduler	Min RSRP (dBm)	Diversity Support (DL)
GN01_1	43	GN01_1(0)	E-UTRA Band 4 - 20MHz	2100	Default UE Equipment	16	Proportional Fair	-140	MU-MIMO
GN01_1	43	GN01_1(1)	E-UTRA Band 4 - 20MHz	2250	Default UE Equipment	16	Proportional Fair	-140	MU-MIMO
GN01_2	43	GN01_2(0)	E-UTRA Band 4 - 20MHz	2150	Default UE Equipment	16	Proportional Fair	-140	MU-MIMO
GN01_2	43	GN01_2(1)	E-UTRA Band 4 - 20MHz	2050	Default UE Equipment	16	Proportional Fair	-140	MU-MIMO
GN01_3	43	GN01_3(0)	E-UTRA Band 4 - 20MHz	2250	Default UE Equipment	16	Proportional Fair	-140	MU-MIMO
GN01_3	43	GN01_3(1)	E-UTRA Band 4 - 20MHz	2150	Default UE Equipment	16	Proportional Fair	-140	MU-MIMO
GN02_1	43	GN02_1(0)	E-UTRA Band 4 - 20MHz	2200	Default UE Equipment	16	Proportional Fair	-140	MU-MIMO
GN02_1	43	GN02_1(1)	E-UTRA Band 4 - 20MHz	2050	Default UE Equipment	16	Proportional Fair	-140	MU-MIMO
GN02_2	43	GN02_2(0)	E-UTRA Band 4 - 20MHz	2150	Default UE Equipment	16	Proportional Fair	-140	MU-MIMO
GN02_2	43	GN02_2(1)	E-UTRA Band 4 - 20MHz	2100	Default UE Equipment	16	Proportional Fair	-140	MU-MIMO
GN02_3	43	GN02_3(0)	E-UTRA Band 4 - 20MHz	2100	Default UE Equipment	16	Proportional Fair	-140	MU-MIMO
GN02_3	43	GN02_3(1)	E-UTRA Band 4 - 20MHz	2250	Default UE Equipment	16	Proportional Fair	-140	MU-MIMO
GN03_1	43	GN03_1(0)	E-UTRA Band 4 - 20MHz	2150	Default UE Equipment	16	Proportional Fair	-140	MU-MIMO
GN03_1	43	GN03_1(1)	E-UTRA Band 4 - 20MHz	2050	Default UE Equipment	16	Proportional Fair	-140	MU-MIMO
GN03_2	43	GN03_2(0)	E-UTRA Band 4 - 20MHz	2250	Default UE Equipment	16	Proportional Fair	-140	MU-MIMO
GN03_2	43	GN03_2(1)	E-UTRA Band 4 - 20MHz	2100	Default UE Equipment	16	Proportional Fair	-140	MU-MIMO
GN03_3	43	GN03_3(0)	E-UTRA Band 4 - 20MHz	2250	Default UE Equipment	16	Proportional Fair	-140	MU-MIMO
GN03_3	43	GN03_3(1)	E-UTRA Band 4 - 20MHz	2150	Default UE Equipment	16	Proportional Fair	-140	MU-MIMO
GN04_1	43	GN04_1(0)	E-UTRA Band 4 - 20MHz	2050	Default UE Equipment	16	Proportional Fair	-140	MU-MIMO
GN04_1	43	GN04_1(1)	E-UTRA Band 4 - 20MHz	2150	Default UE Equipment	16	Proportional Fair	-140	MU-MIMO
GN04_2	43	GN04_2(0)	E-UTRA Band 4 - 20MHz	2250	Default UE Equipment	16	Proportional Fair	-140	MU-MIMO



Anexo J: Configuración de celdas Atoll™, parte #2.

GN04_3	43	GN04_3(0)	E-UTRA Band 4 - 20MHz	2100	Default UE Equipment	16	Proportional Fair	-140	MU-MIMO
GN04_3	43	GN04_3(1)	E-UTRA Band 4 - 20MHz	2100	Default UE Equipment	16	Proportional Fair	-140	MU-MIMO
GN05_1	43	GN05_1(0)	E-UTRA Band 4 - 20MHz	2100	Default UE Equipment	16	Proportional Fair	-140	MU-MIMO
GN05_1	43	GN05_1(1)	E-UTRA Band 4 - 20MHz	2050	Default UE Equipment	16	Proportional Fair	-140	MU-MIMO
GN05_2	43	GN05_2(0)	E-UTRA Band 4 - 20MHz	2200	Default UE Equipment	16	Proportional Fair	-140	MU-MIMO
GN05_2	43	GN05_2(1)	E-UTRA Band 4 - 20MHz	2250	Default UE Equipment	16	Proportional Fair	-140	MU-MIMO
GN05_3	43	GN05_3(0)	E-UTRA Band 4 - 20MHz	2100	Default UE Equipment	16	Proportional Fair	-140	MU-MIMO
GN05_3	43	GN05_3(1)	E-UTRA Band 4 - 20MHz	2150	Default UE Equipment	16	Proportional Fair	-140	MU-MIMO
GN06_1	43	GN06_1(0)	E-UTRA Band 4 - 20MHz	2250	Default UE Equipment	16	Proportional Fair	-140	MU-MIMO
GN06_1	43	GN06_1(1)	E-UTRA Band 4 - 20MHz	2050	Default UE Equipment	16	Proportional Fair	-140	MU-MIMO
GN06_2	43	GN06_2(0)	E-UTRA Band 4 - 20MHz	2050	Default UE Equipment	16	Proportional Fair	-140	MU-MIMO
GN06_2	43	GN06_2(1)	E-UTRA Band 4 - 20MHz	2250	Default UE Equipment	16	Proportional Fair	-140	MU-MIMO
GN06_3	43	GN06_3(0)	E-UTRA Band 4 - 20MHz	2150	Default UE Equipment	16	Proportional Fair	-140	MU-MIMO
GN06_3	43	GN06_3(1)	E-UTRA Band 4 - 20MHz	2200	Default UE Equipment	16	Proportional Fair	-140	MU-MIMO
GN07_1	43	GN07_1(0)	E-UTRA Band 4 - 20MHz	2100	Default UE Equipment	16	Proportional Fair	-140	MU-MIMO
GN07_1	43	GN07_1(1)	E-UTRA Band 4 - 20MHz	2200	Default UE Equipment	16	Proportional Fair	-140	MU-MIMO
GN07_2	43	GN07_2(0)	E-UTRA Band 4 - 20MHz	2050	Default UE Equipment	16	Proportional Fair	-140	MU-MIMO
GN07_2	43	GN07_2(1)	E-UTRA Band 4 - 20MHz	2100	Default UE Equipment	16	Proportional Fair	-140	MU-MIMO
GN07_3	43	GN07_3(0)	E-UTRA Band 4 - 20MHz	2200	Default UE Equipment	16	Proportional Fair	-140	MU-MIMO
GN07_3	43	GN07_3(1)	E-UTRA Band 4 - 20MHz	2150	Default UE Equipment	16	Proportional Fair	-140	MU-MIMO



Anexos K: Configuración de celdas Atoll™, parte #3.

Physical Cell ID	SSS ID status	Channel Allocation Status	Layer	PSS ID status	PSS ID	SSS ID	Number of PRACH RSI Required	PRACH Root Sequences	PRACH RSI Allocation Status	Order
7	Allocated	Allocated	Macro Layer	Allocated	1	2	1	743	Allocated	1
58	Allocated	Allocated	Macro Layer	Allocated	1	19	1	0	Allocated	2
179	Allocated	Allocated	Macro Layer	Allocated	2	59	1	779	Allocated	1
24	Allocated	Allocated	Macro Layer	Allocated	0	8	1	0	Allocated	2
15	Allocated	Allocated	Macro Layer	Allocated	0	5	1	741	Allocated	1
29	Allocated	Allocated	Macro Layer	Allocated	2	9	1	0	Allocated	2
48	Allocated	Allocated	Macro Layer	Allocated	0	16	1	92	Allocated	1
45	Allocated	Allocated	Macro Layer	Allocated	0	15	1	515	Allocated	2
18	Allocated	Allocated	Macro Layer	Allocated	0	6	1	739	Allocated	1
21	Allocated	Allocated	Macro Layer	Allocated	0	7	1	19	Allocated	2
53	Allocated	Allocated	Macro Layer	Allocated	2	17	1	1	Allocated	1
41	Allocated	Allocated	Macro Layer	Allocated	2	13	1	158	Allocated	2
281	Allocated	Allocated	Macro Layer	Allocated	2	93	1	718	Allocated	1
3	Allocated	Allocated	Macro Layer	Allocated	0	1	1	735	Allocated	2
55	Allocated	Allocated	Macro Layer	Allocated	1	18	1	96	Allocated	1
450	Allocated	Allocated	Macro Layer	Allocated	0	150	1	744	Allocated	2
23	Allocated	Allocated	Macro Layer	Allocated	2	7	1	494	Allocated	1
16	Allocated	Allocated	Macro Layer	Allocated	1	5	1	0	Allocated	2
39	Allocated	Allocated	Macro Layer	Allocated	0	13	1	827	Allocated	1
44	Allocated	Allocated	Macro Layer	Allocated	2	14	1	494	Allocated	2
20	Allocated	Allocated	Macro Layer	Allocated	2	6	1	575	Allocated	1



Anexos L: Configuración de celdas Atoll™, parte #4.

Physical Cell ID	SSS ID status	Channel Allocation Status	Layer	PSS ID status	PSS ID	SSS ID	Number of PRACH RSI Required	PRACH Root Sequences	PRACH RSI Allocation Status	Order
1	Allocated	Allocated	Macro Layer	Allocated	1	0	1	266	Allocated	1
142	Allocated	Allocated	Macro Layer	Allocated	1	47	1	64	Allocated	2
2	Allocated	Allocated	Macro Layer	Allocated	2	0	1	720	Allocated	1
36	Allocated	Allocated	Macro Layer	Allocated	0	12	1	363	Allocated	2
12	Allocated	Allocated	Macro Layer	Allocated	0	4	1	101	Allocated	1
25	Allocated	Allocated	Macro Layer	Allocated	1	8	1	691	Allocated	2
4	Allocated	Allocated	Macro Layer	Allocated	1	1	1	556	Allocated	1
8	Allocated	Allocated	Macro Layer	Allocated	2	2	1	0	Allocated	2
14	Allocated	Allocated	Macro Layer	Allocated	2	4	1	90	Allocated	1
33	Allocated	Allocated	Macro Layer	Allocated	0	11	1	0	Allocated	2
13	Allocated	Allocated	Macro Layer	Allocated	1	4	1	737	Allocated	1
31	Allocated	Allocated	Macro Layer	Allocated	1	10	1	718	Allocated	2
6	Allocated	Allocated	Macro Layer	Allocated	0	2	1	734	Allocated	1
50	Allocated	Allocated	Macro Layer	Allocated	2	16	1	690	Allocated	2
9	Allocated	Allocated	Macro Layer	Allocated	0	3	1	277	Allocated	1
49	Allocated	Allocated	Macro Layer	Allocated	1	16	1	440	Allocated	2
5	Allocated	Allocated	Macro Layer	Allocated	2	1	1	64	Allocated	1
28	Allocated	Allocated	Macro Layer	Allocated	1	9	1	316	Allocated	2
10	Allocated	Allocated	Macro Layer	Allocated	1	3	1	557	Allocated	1
46	Allocated	Allocated	Macro Layer	Allocated	1	15	1	0	Allocated	2



Anexo M: Condiciones de referencia de los principales parámetros en LTE.

		RSRP (dBm)	RSRQ (dB)	SINR (dB)
Condiciones de la interfaz aire (RF)	Excelente	> -75	> -9	≥ 20
	Bueno	$-75 \text{ a } -95$	$-9 \text{ a } -12$	$13 \text{ a } 20$
	Neutral	$-95 \text{ a } -100$	$-12 \text{ a } -13$	$0 \text{ a } 13$
	Poco aceptable	≤ -100	< -13	≤ 0